

Kuvauskorkeuden yhteys digitaalisen korkeusmallin tarkkuuteen ja rannan geomorfologisten muotojen havaitsemiseen Structure from Motion -tekniikkaa käyttäen

Jaakko Niemi

791619S
Pro gradu -tutkielma
Maantieteen tutkimusyksikkö
Oulun yliopisto
Joulukuu 2019

| | | | |
|--|--------------------|----------------|------------------------------------|
| Yksikkö: | Pääaine: | | |
| Maantieteen tutkimusyksikkö | Maantiede | | |
| Tekijä (Sukunimi ja etunimet, myös entinen sukunimi): | Opiskelija-numero: | 1730311 | Tutkielman sivumäärä: 68 s. |
| Niemi, Jaakko Tapani | | | |
| Tutkielman nimi (suomeksi; muun kielinen nimi ilmoitetaan vain, jos se on tutkielman kieli): | | | |
| Kuvauskorkeuden yhteys digitaalisen korkeusmallin tarkkuuteen ja rannan geomorfologisten muotojen havaitsemiseen Structure from Motion -tekniikkaa käyttäen | | | |
| Asiasanat: Structure from Motion, kaukokartoitus, rannat. | | | |
| Tiivistelmä (kirjoitetaan vapaamuotoisesti, selväsanaisesti ja lyhyin lauserakentein, ks. ohje seuraavalla sivulla): | | | |
| <p>Dronella suoritettu lentokuvaus ja SfM:lla (Structure from Motion) prosessoitu alueiden mallintaminen kuvista on yleistynyt viime vuosina geomorfologiassa, ja sen kustannustehokkuus sekä tarkkuus ovat vertailukelpoisia muihin kaukokartoitus- ja kuvausmenetelmiin verrattuina. SfM-tekniikan ollessa suhteellisen uutta työväitteiden validointiin ja yleisiin suoritustapoihin tulee kiinnittää huomiota. Tässä tutkimuksessa kiinnostuksen kohteena on lentokorkeus ja sen vaikutus digitaalisten mallien tarkkuuteen tutkittaessa rannan geomorfologisia muotoja. Tämän pro gradun tutkimuskysymykset ovat: 1. Paljonko kuvauskorkeudella on vaikutusta SfM-tekniikalla tuotettujen digitaalisten pintamallien tarkkuuteen kuvatessa pienten korkeuserojen ranta-aluetta? 2. Kumpi käytetyistä lentokorkeuksista on tarkoituksenmukaisempi vaihtoehto kuvatessa ranta-aluetta ja tunnistessa sen pinnanmuotoja?</p> <p>Tutkimuksen aineistona on Hailuodon Marjaniemessä dronella ilmakuvaattu valokuva-aineisto. Kuvaus tehtiin 59 metrin ja 53,7 metrin korkeudelta. Kuvat käsiteltiin SfM-prosessin mukaisesti Agisoft Photoscan 1.4.4. build 6848-ohjelmistolla. Aineiston jatkokäsittely tehtiin ArcMap 10.6 -ohjelmistolla. Tilastollisten tunnuslukujen laskemisessa sekä kuvaajien teossa käytettiin Microsoft Excel -ohjelmaa ja IBM SPSS Statistics 25 -ohjelmistoa. SfM-mallien luotettavuutta ja toistettavuutta arvioitiin laskemalla keskineliövirheen neliöjuuri (RMSE) malleihin sisältyvän paikkatiedon osalta, vertaamalla mallien korkeustietoja Maanmittauslaitoksen saman alueen korkeusmallin korkeustietoihin sekä laskemalla aineistojen väliset Spearmanin järjestyskorrelaatiokertoimet ja selitysasteet. Absoluuttista tarkkuutta tarkasteltiin vertaamalla SfM:lla tehtyjen korkeusmallien korkeustietoja itsenäisiin GPS-mitattuihin korkeustietoihin ja laskemalla näiden perusteella RMSE. Mallien tarkoituksenmukaisuutta arvioitiin edelleen visuaalisella tarkastelulla tarkkuuden ja pinnanmuotojen havaitsemisen suhteen.</p> <p>RMSE malliin kuuluvan paikkatiedon osalta oli 59m-mallin osalta 4,29 cm ja 53,7(a)-mallissa 2,03 cm sekä 53,7(b)-mallissa 5,17 cm. Spearmanin järjestyskorrelaatiokertoimet olivat vertailuaineiston ja 59m-mallin välillä 0,961 sekä vertailuaineiston ja 53,7(b):n välillä 0,807, ja näiden mallien välinen korrelaatiokerroin oli 0,829. Vertailudatan ja mallien selitysasteet olivat 93 % (59m) ja 75 % (53,7(b)). Itsenäiseen paikkatietoon verrattessa RMSE oli samassa järjestyksessä 31 cm ja 374 cm. Visuaalisen tarkastelun osalta 53,7m-malli osoittautui luotettavammaksi. Tämän tutkimuksen päähuomiot ovat, että lentokorkeudella ei voida katsoa olevan yksiselitteistä ja systemaattista yhteyttä malleihin, ja että laaduntarkastelussa on käytettävä useampaa arviointitapaa ja itsenäistä vertailuaineistoa. SfM:n kokonaisprosessin hallinta vaatii syvää perehtyneisyyttä.</p> | | | |
| Muita tietoja: | | | |
| Päiväys: | 10.12.2019 | | |

Sisältö

| | |
|--|----|
| 1. JOHDANTO | 4 |
| 2. STRUCTURE FROM MOTION (SfM) -TEKNIikka GEOMORFOLOGIASSA | 9 |
| 2.1. SfM:n periaate | 9 |
| 2.2. SfM:n prosessi | 10 |
| 2.3. SfM-tekniikalla tuotettujen digitaalisten mallien tarkkuuden arviointi | 14 |
| 2.4. Aikaisempi tutkimus rantojen geomorfologisessa viitekehysessä | 17 |
| 3. RANNAN GEOMORFOLOGIA | 21 |
| 3.1. Rannan profiili | 21 |
| 3.2. Sedimentin kulkeutuminen | 24 |
| 3.3. Aallonmerkit | 26 |
| 4. TUTKIMUSALUE | 27 |
| 5. TUTKIMUSMENETELMÄT | 30 |
| 5.1. Kenttätyöt | 30 |
| 5.2. Kuvankäsittely ja aineiston prosessointi | 32 |
| 5.3. Aineiston jatkoprosessointi | 33 |
| 5.4. Mallien tarkkuuden arviointi | 34 |
| 5.5. Vertailuaineisto | 36 |
| 6. TULOKSET | 39 |
| 6.1. Tarkkuusmitattujen paikkatietopisteitten (GCP) paikkavirhe | 39 |
| 6.2. Suhteellinen tarkkuus vertailudatan korkeustietojen suhteen | 42 |
| 6.3. Pintamallien välinen korrelaatio | 43 |
| 6.4. Absoluuttinen tarkkuus | 45 |
| 6.5. Pintamallien visuaalinen tarkastelu ja pinnanmuotojen havaitseminen | 45 |
| 7. POHDINTA | 53 |
| 7.1. GCP:itten arvioitu paikkatietovirhe | 53 |
| 7.2. Pintamallien suhteellinen tarkkuus sekä pintamallien välinen korrelaatio | 55 |
| 7.3. Absoluuttinen tarkkuus | 56 |
| 7.4. Pintamallien visuaalinen tarkastelu ja pinnanmuotojen havaitseminen | 59 |
| 7.5. Tutkimuksen luotettavuuden arviointi | 60 |
| 8. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET | 61 |
| LÄHTEET | 63 |

1. JOHDANTO

Exeterin yliopiston tutkija Andrew Cunliffe kollegoineen teki structure from motion -tekniikkaa (SfM) hyväksikäyttäen tutkimuksessaan havainnon, että vuonna 2017 eroosion nopeus eräällä Kanadassa sijaitsevalla rannalla oli jopa 14,5 metriä 40 päivän aikana (Cunliffe ym. 2019). Tutkijat huomattavat, että näin nopea rannan kuluminen on erittäin radikaalia, kun ottaa huomioon, että kyseinen ranta on kulunut 2,2 metriä vuodessa vertailujaksolla 1952–2017. Havainnon dramaattisuutta lisää vielä se, että 30 % havaitusta vuoden 2017 nopeasta rannan kulumisesta tapahtui vain neljän päivän aikana, jolloin alueella vaikutti myrsky.

SfM-tekniikassa on Westboyn ym. (2012) mukaan kyse siitä, että suuren päällekkäisyyden omaavista monista digitaalisista kuvista muodostetaan 3d-malli tarkastelua tai jatkoanalyysiä varten. Vaikka Nouwakpo kumppaneineen (2014) toteavat, että SfM on vielä kehittyasteella, ja myös itse tutkimusmenetelmää tutkitaan vielä, on dronella, tai UAV:lla, (unmanned aerial vehicle) suoritettu SfM:lla tehty rajattujen alueiden kuvantaminen yleistynyt viime vuosina geomorfologiassa (Smith ym. 2015) ja sen kustannustehokkuus ja tarkkuus ovat vertailukelpoisia muihin kaukokartoitus- ja kuvantamismenetelmiin verrattuna. Lisäksi verrattuna muihin kaukokartoitus- ja kuvantamismenetelmiin SfM-tekniikka vaatii vain vähän aikaisempaa perehtyneisyyttä ja asiantuntemusta (Micheletti ym. 2015).

Geomorfologia tutkii maanpinnan muotoja sekä näitä maanpinnan muotoja muokkaavia prosesseja Huggett (2011). Kiinnostuksen kohteena ovat siis prosessien ja muotojen väliset suhteet ja muutos tietyssä ajassa ja tilassa. Huggett (2011) ja Micheletti ym. (2015) jaottelevat geomorfologiset alueet ja prosessit hyvin yhtenevästi, joskin Micheletti ym. (2015) nostavat esiin ihmistoiminnan vaikutukset fyysiseen ympäristöön.

Peruslähtökohtana monelle geomorfologiselle tutkimukselle ovat topografiset tiedonkeräykset ja tiedonkeräysmenetelmien soveltaminen, jotta pinnanmuotoihin ja niihin vaikuttaviin prosesseihin päästäisiin käsiksi (Micheletti ym. 2015). Etenkin muutoksen mittaaminen on edellytys geomorfologisia prosesseja tutkittaessa (Cook 2016; Marteau ym. 2016). Muutoksen mittaaminen vaatii toistettavuutta mittauksissa. Clapuyt ym. (2015) tutkivatkin juuri SfM:n toistettavuutta, koska hyvä ajallinen erotuskyky ja datan luotettavuus takaavat pohjan havainnoida muotoja sekä geomorfologisten prosessien dynamiikan suuntaa ja suuruutta. Eri mittauskertojen satunnaiset erot ja virheet johtavat herkästi systemaattisiin virheisiin geomorfologisissa malleissa. Näin ollen SfM:n luotettavuus ja toistettavuus ovatkin saaneet huomiota myös esimerkiksi Dietrichin (2014) väitöskirjassa, jossa hän tutki tekniikan tarkkuutta, epävarmuutta ja toistettavuutta geomorfologisessa viitekehyksessä. SfM-tekniikan ollessa suhteellisen uutta verrattuna konventionaalisiin kuvaus- ja kartoitusmenetelmiin työvaiheitten validointiin ja yleisiin suoritustapoihin tulee kiinnittää huomiota, esimerkiksi maassa olevien tarkkuusmitattujen paikkatietopisteitten (Tonkin & Midgley 2016) ja lentokorkeuden (Küng ym. 2011) osalta.

Eri kuvauskorkeuksilla ja maassa olevien tarkkuusmitattujen paikkatietopisteitten (Ground control point, GCP) lukumäärällä sekä sijoittelulla on todettu olevan vaikutusta SfM:lla tehtyjen tuotteiden tarkkuuteen kuvatessa esimerkiksi matalan kasvillisuuden aluetta (Mesas-Carrascosa ym. 2015). Yksi tavallinen tapa arvioida lopullisten SfM-tuotteitten laatua on tuottaa pitkälle automatisoidussa SfM-prosessissa keskineliövirheen neliöjuuri todennetun paikkatiedon ja arvioidun paikan väliltä (root mean square error, RMSE) (Russell 2016; Cullen ym. 2018). Koska drone-alustaiset SfM-tekniikkaa hyödyntävät vaihtoehdot ovat kustannustehokkaita ja vertailukelpoisia muihin digitaalisiin menetelmiin nähden (Smith ym. 2015), tulee tämä tekniikka mitä todennäköisemmin tulevaisuudessa lisääntymään luonnonmaantieteellisessä ja geomorfologisessa kuvantamisessa.

Englanninkielistä kirjallisuutta aiheesta on, mutta suomeksi tehtyjä tutkimuksia on vähän. Tämän vuoksi menetelmäaiheinen perustutkimus ja kirjallisuus on perusteluta ja se tuo lisätietoa pyrittäessä hahmottamaan yleistettyjä toimintamalleja

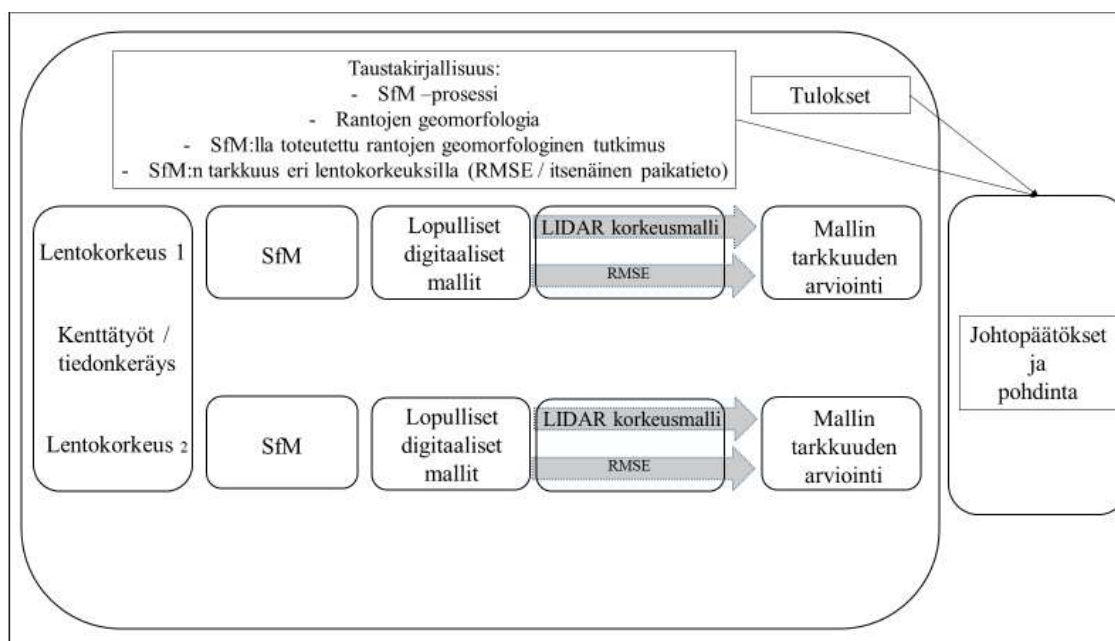
tietäntyyppisille kuvantamiskohteille ja se lisää tietoa kustannustehokkaista toimintamalleista ajan, osaamisen ja taloudellisten resurssien suhteen.

Tässä tutkimuksessa kiinnostuksen kohteena on kuvauskorkeus ja sen vaikutus digitaalisten SfM-mallien tarkkuuteen tutkittaessa rannan geomorfologisia motoja. Dronella tehtävään alueen SfM-kuvantamiseen liittyy monia epävarmuutta aiheuttavia tekijöitä (Smith ym. 2015), ja tähän tutkimukseen on valittu muuttuvaksi muuttujaksi kuvauskorkeus. Muodostettujen SfM-mallien GCP:itten avulla tuotetaan RMSE, joka kertoo paikannettujen GCP:itten arvoidun paikkatietovirheen, kun 2d -mallista on uudelleenprojisoitu 3d-malli (Agisoft PhotoScan User Manual: 46). Toisena tarkkuuden arviointimenetelmänä on mallien vertaaminen vertailuaineistona käytettyyn LiDAR (Light Detection and Ranging) -korkeusmalliin. Kolmantena evaluointikeinona on mallien korkeustietojen vertaaminen itsenäisten GPS-mitattujen pisteitten korkeustietoon. Saatua tuloksia verrataan sekä taustakirjallisuuteen rantojen geomorfologiasta että aikaisempiin SfM-tekniikalla tehtyihin ranta-alueiden geomorfologian alan tutkimuksiin. Laadittujen mallien käytettävyyttä arvioidaan myös tarkastelemalla visuaalisesti eroja siinä, miten hyvin rannan geomorfologisia rakenteita ja yksityiskohtia voi erottaa SfM-tuotteista eri kuvauskorkeuksien välillä. Tämän kautta pyritään saamaan lisää tietoa kuvauskorkeuden vaikutuksesta SfM-periaatteella tuotetun digitaalisen mallin tarkkuuteen ja menetelmän soveltuvuuteen rantojen geomorfologiaa tutkittaessa.

Tämän pro gradun tutkimuskysymykset ovat:

1. Paljonko kuvauskorkeudella on vaikutusta SfM-tekniikalla tuotettujen digitaalisten pintamallien tarkkuuteen kuvatessa pienten korkeuserojen ranta-aluetta?
2. Kumpi käytetyistä lentokorkeuksista on tarkoituksenmukaisempi vaihtoehto kuvatessa ranta-aluetta ja tunnistessa sen pinnanmuotoja?

Tutkimuksen viitekehys on esitetty kuvassa 1. Tutkimuksessa tarkastellaan ja analysoidaan kahdella eri mittauskerralla (lentokerralla ja -korkeudella) saatua dataa ja verrataan saatuja tuloksia keskenään sekä lähdekirjallisuuteen. Vastaus ensimmäiseen kysymykseen saadaan laskemalla mallien GCP:itten arvoitu virhe (RMSE), kun kaksiulotteisesta tasosta tehdään 3d-malli. Lisäksi molempien lentokorkeusien avulla kerätyn datan ja muodostetun aineiston vertaaminen itsenäiseen LiDAR-aineistoon ja tilastollisten tunnuslukujen laskeminen sekä vertaaminen itsenäisiin, malleihin kuulumattomiin korkeustietoihin tuo lisää luotettavuutta saatujen SfM-mallien tarkkuuden ja luotettavuuden arviointiin. Tutkimus tulee noudattamaan kvantitatiivisen tutkimusprosessin periaatteita (Heikkilä 2014). Toiseen tutkimuskysymykseen vastataan tarkastelemalla mallien visuaalista tarkkuutta ja niiden kykyä paljastaa rannan eri mittaluokan rakenteita kuten rannan profiilin osia ja aallonmerkkikuvioita.



Kuva 1. Tutkimuksen viitekehys ja rakenne. Lentokorkeuden vaikutusta Structure from motion (SfM) mallin tarkkuuteen ranta-aluetta kuvattaessa tutkitaan kahdella eri lentokorkeudella ja saatuja tuloksia verrataan aikaisempaan tutkimukseen. Pintamallien tarkkuutta arvioidaan sekä itsenäisten GPS-pisteiden ja tutkimusaineiston keskineliövirheen neliöjuuren (RMSE) avulla että vertaamalla laskettujen mallien korkeustietoja LiDAR (Light detection and ranging) korkeusmallin korkeustietoihin samoista mittauspisteistä.

2. STRUCTURE FROM MOTION (SfM) -TEKNIikka GEOMORFOLOGIASSA

2.1. SfM:n periaate

SfM:n juuret ulottuvat Dietrichin (2014) mukaan 1970-luvun loppuun, jolloin Ullmanin (1979) teos *The interpretation of visual motion* julkaistiin. Teoksen motiivit eivät tosin ole geomorfologiassa, vaan se antaa työkaluja niihin ongelmiin, joita tulee tietyn visuaalisen järjestelmän kykyyn havaita yksi ja sama muoto, jonka liike on jatkunut edellisestä kuvasta sekä ongelmaan mitä tulee kolmiulotteisen muodon hahmottamiseen, kun muoto on tunnistettu. Westboy ym. (2012) nostavat esiin SfM:n kehitykseen liittyen Föstnerin (1986) artikkelin, jossa artikkelin kirjoittaja esittelee uuden muotoon perustuvan algoritmin kuvaparien tunnistusta varten.

Perinteisessä kuvanmittauksessa on käytetty stereoparia, eli kahta valokuvaa, jotka on otettu kalibroiduilla kameroilla, tai kameralla, joiden välinen etäisyys on vakoitu (tai kahden kuvan välinen etäisyys toisistaan on vakioitu) sekä huomioon on otettu edelleen kameroiden linssin aiheuttamat virheet, kameran sijainti ja kuvien geometria. Trigonometrian avulla kuvista on voitu laskea kameran etäisyys kohteisiin. Sama periaate, kuvanmittaus, on myös SfM-menetelmän tavoite (Westboy ym. 2012; Dietrich 2014).

Digitaalisen SfM-mallinnuksen avulla kuvanmittauksessa päästään lyhyessä ajassa tuhansiin stereoparien laskentaan ja edelleen tätä kautta voidaan luoda kolmiulotteisia malleja halutuista kohteista. SfM:ssa kahden kuvan sijaan geometrian rakentamiseen tarvitaan vähintään kolmen kuvan päällekkäisyys. Toisaalta kameran sijainnit voidaan laskea jälkikäteen sekä kuvauksen voi kohteesta riippuen suorittaa maasta tai ilmasta käsin eri kameralavetteja käyttäen. Kuvaukseen voidaan käyttää käytännössä kaikkia kaupallisia kameroita tai jopa kännykkäkameroita. Tekniikka tarjoaa nopean ja halvan sekä pitkälle automatisoidun tavan kerätä 3d-muotoista dataa halutuista geomorfologisista kohteista (Dietrich 2014; Micheletti ym. 2014; Micheletti ym. 2015; Smith & Vericat 2015; Cook 2016).

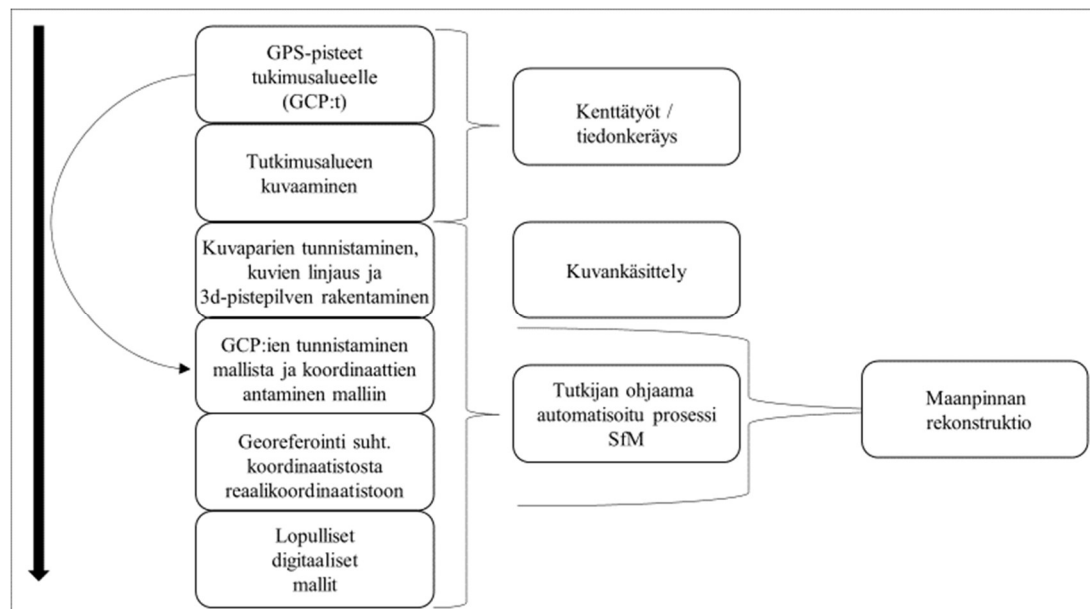
Edelleen Micheletti ym. (2014) summaavat SfM-menetelmästä kolme etua verrattuna perinteisiin kuvaus- ja mallinnusmenetelmiin: kuvaaminen on helpompaa kuin vanhemmissa kuvausmenetelmissä koska kameran sijainnilla, laadulla ja geometrialla ei ole niin suurta merkitystä, datan käsittely on nopeaa ja taloudellinen rasite on pieni.

2.2. SfM:n prosessi

SfM:n työprosessi, tai datan keräämisen ja analysoinnin vaiheiden periaatteet, ovat pitkälle yhtenevät riippumatta itse tutkimuskohteesta (kuva 2). Kenttätöihin kuuluvat maasijoitteisten tarkkuusmitattujen GPS-pisteiden (GCP) merkitseminen tutkimusalueelle myöhempää valokuvista tunnistusta ja georeferenssiä varten sekä itse kuvien hankinta. Datankäsittely tapahtuu pitkälle automatisoidun tiedonkäsittelyn keinoin ja pitää sisällään neljä vaihetta: kameran kohdistamisen, tiheän pistepilven rakentamisen, kuvaverkon (mesh) muodostamisen sekä kuvaverkon teksturointi esimerkiksi ortomosaiikkimuotoon (Westboy ym. 2012; Bryson ym. 2013; Marteau ym. 2016; Agisoft PhotoScan User Manual: 46).

Ensimmäisessä vaiheessa kuvankäsittelyohjelma etsii valokuvista kiintopisteet ja laskee kameran sijainnin jokaiselle valokuvalle, sekä tarkentaa kameran kalibrointiparametrit. Lopputuloksena on harva pistepilvi (*sparse point cloud*) sekä joukko laskettuja kameran paikkoja. Tätä pistepilveä ei käytetä jatkossa 3d-mallin rakentamisessa, mutta kameran sijainnit tarvitaan datan jatkoprosessoinnissa. Toisessa vaiheessa laskettujen kameran sijaintien sekä valokuvien perusteella SfM-prosessi muodostaa tiheän pistepilven (*dense point cloud*). Tätä pistepilveä voidaan tarvittaessa manipuloida ja luokitella ennen kuin sen avulla rakennetaan seuraavassa prosessoinnin vaiheessa kuvaverkko. Kolmannessa vaiheessa kaksiulotteisesta pinnasta rekonstruoidaan 3d-malli, eli muodostetaan monikulmainen ”verkko” (*mesh*). Verkon muodostamisen jälkeen sitä voidaan tarvittaessa korjata manuaalisesti. Kun halutun mallin geometria on onnistuttu mallintamaan, sitä voidaan käyttää eri tekstuureiden, kuten esimerkiksi ortomosaiikin ja DEM:in luomiseen. Rakennetut pintamallit siirretään suhteellisesta koordinaatistosta reaali maailman koordinaatistoon mallista tunnistettavien GCP:itten avulla niin, että tutkija manuaalisesti syöttää tietyn GCP:n paikkatiedon, jonka jälkeen näitä

paikkatietoja käytetään 3d-mallia sitoessa tiettyihin kiintopisteisiin. (Agisoft PhotoScan User Manual: 46).



Kuva 2. Structure from motion (SfM) työprosessi kuvattuna alkaen kenttätöistä päätyen digitaalisiin lopputuotteisiin. SfM-prosessin vaiheet noudattavat samaa periaatetta riippumatta itse tutkimusaiheesta tai -kohteesta (mukailtu Westboy ym. 2012 ja Bryson ym. 2013 mukaan).

Micheletti ym. (2015) muistuttavat, että vaikka SfM-tekniikka tarjoaakin nopean, halvan ja pitkälle automatisoidun tavan hankkia 3d-muotoista informaatiota tutkimuskohteesta monella eri skaalalla ja moneen eri tarkoitukseen, voi pitkälle edennyt automatisaatio johtaa siihen, että SfM:n loppukäyttäjät keskittyvät enemmän lopullisen mallin visualisointiin kuin itse datan laadun analysointiin. Dietrich (2014) viittaa samaan asiaan toteamalla, että tuotettujen mallien epävarmuuden arviointiin tulee kiinnittää huomiota, jotta välttyttäisiin tulosten väärintulkinnalta etenkin tulkitessa muutosta. Dietrich (2014) ja Clapuyt ym. (2015) tuovat esiin sen, että prosessi ei ole vapaa tutkijan huolellisuudesta viittaamalla georeferoinnissa tarvittavien tarkkuusmitattujen GPS-pisteitten (GCP) suureen merkitykseen luotettavien 3d-mallien aikaansaamiseksi niin, että georeferenssin tarkkuus heikkenee GCP:itten välimatkan kasvaessa toisiinsa tai jos GCP:t ovat epätasaisesti levitetty tutkimusalueelle. GCP:itten suuri lukumäärä pinta-alaa kohden antaa

mahdollisuuden tarkalle georeferoitiolle, mutta samalla virheet lisääntyvät mitä kauemmaksi GCP-peitosta mennään kohti tutkimusalueen reunoja. Carbonneau & Dietrich (2016) lisäksi tähdentävät, että vaikka dronet ovatkin halpoja, vaativat GCP:t nykyisin hintavan tarkkuus-GPS:n, jotta paikkatieto saadaan tarkasti mitattua.

Geomorfologista muutosta tulkitessa epävarmuuden tarkastelu tapahtuu useampana eri ajankohtana kerätyistä datasta. Marteau ym. (2016) mainitsevat, että muutoksen tarkastelussa tuotettujen 3d-kuvien tai pistepilvien (tai ortokuvan) suora vertaaminen on toki mahdollista, mutta tarkempi tapa on muodostaa kahden eri aikana tuotetun digitaalisen korkeusmallin, eli DEM:n pohjalta digital elevation model of difference (Dod), jossa kaksi DEM:a ”asetetaan päällekkäin” ja lasketaan uusi kartta kahden DEM:n eroista. Menetelmää on käytetty esimerkiksi Gomez-Gutierrezin ym. (2014) tutkimuksessa veden uurtaman jyrkänteen rannan vetäytymisen intensiteettiä tutkittaessa ja Marteau ym. (2016) tutkimuksessa, jossa mallinnettiin joenuoman entisöinnin vaikutuksia joenuoman eroosioon ja kasaantumiseen, sekä Lucieerin ym. (2014) tutkimuksessa, jossa he tuottivat kahden eri digitaalisen korkeusmallin erotuksen havainnollistaakseen maanvyörymän tai -liukuman dynamiikkaa.

Dod:ien rakentaminen ei kuitenkaan ratkaise itsenäisten eri ajanjaksolla tuotettujen pintamallien hyvyyden arvioinnin ongelmaa, koska mahdolliset virheet georeferoinnissa sisältyvät itsenäisiin malleihin erikseen. Näin ollen digitaalisten mallien luotettavuutta arvioitaessa on arvioitava kumpaakin mallia erikseen. Tämä tapahtuu esimerkiksi tarkastelemalla SfM:n tuotteen RMS-virhettä (Russell 2016, Cullen ym. 2018). RMSE:n tulkinnessa on kuitenkin huomioitava, että SfM-prosessi pyrkii arviomaan georeferoinnin virhettä jo itse malliin sisältyvällä datalla, jonka tutkija on itse manuaalisesti syöttänyt järjestelmään (USGS Unmanned aircraft systems data post-processing Structure-from-motion photogrammetry. USGS National UAS Project Office – March 2017).

Saadun mallin tarkkuuden tarkastelu voidaan tehdä joko arvioimalla itsenäisiä, malliin sisältymättömiä tarkkuusmitattuja GPS-pisteitä, joiden paikkatietoa verrataan SfM-prosessilla tehdyn mallin paikkatietoon (esim. Lucieer ym. 2014; Koci ym. 2017) tai vertaamalla mallia toisella menetelmällä tuotettuun joko

kokeellisen ympäristön referenssiaineistoon (Dietrich 2016) tai vertaamalla malleja eri menetelmien avulla tehtyihin malleihin samasta alueesta, esimerkiksi (Piermattei ym. 2015; Westboy ym. 2015; Wallace ym. 2016)

Vaikka SfM onkin pitkälle automatisoitu, on laaduntarkastus kuitenkin tutkijan vastuulla (Dietrich 2014; Mölk & Bolch 2017), varsinkin kun tiedetään, että kenttätyöt on suunniteltava huolella esimerkiksi GCP:tten sijoittelun osalta (Clapuyt ym. 2015; Dietrich 2015), ja kerätyn aineiston pitkälle automatisoidun prosessoinnin aikana tutkijan suorittamat interventiot prosessiasetusten osalta vaikuttavat lopputulokseen (James ym. 2017). Tekniikan ollessa suhteellisen uutta, saattaa yhtenä sudenkuoppana olla lisäksi se, että tutkija keskittyy saatuihin malleihin itse kontekstin hämärtyessä (Micheletti ym. 2015) varsinkin kun tiedetään, että voimakkaasti vaihtelevat pinnanmuodot aiheuttavat mallin tarkkuuteen epävarmuutta (Cook 2016). Bakker ja Lane (2016) korostavat lisäksi kokonaisprosessin huolellista läpivientiä, jotta rakenteelliset virheet DEM:jä rakennettaessa voidaan välttää.

Monet tutkijat kuitenkin tähdentävät omissa tutkimuksissaan SfM-menetelmän potentiaalia eri geomorfologian konteksteissa (esim. Carbonneau & Dietrich 2016; James ym. 2017; Pearson ym. 2017). Tämä osoittaa mahdollisesti osiltaan sitä, että kyseessä on suhteellisen uusi menetelmä geomorfologisen tiedonkeräyksen alueella, ja tieteen tekemisen malli tätä tekniikka hyödyntäen ei kaikilta osin ole vielä vakiintunut, ja näin ollen sen lisäksi, että tutkimuksen viitekehykset ja kohteet ovat geomorfologiset, painotetaan artikkeleissa myös itse tutkimusmenetelmän käyttöä. Tämä menetelmän hyötyjä esiintuoma painotus tutkimuksissa voinee perustellusti tarkoittaa sitä, että SfM:n geomorfologista potentiaalia ei ole vielä aukikirjoitettu, vaikka menetelmän hyödyt ovatkin yleisesti tiedossa.

2.3. SfM -tekniikalla tuotettujen digitaalisten mallien tarkkuuden arviointi

Geomorfologisten prosessien mallintaminen vaatii SfM:lta sekä tarkkuutta että luotettavuutta. Luotettavuuden arviointiin saadaan kenttätutkimusvaiheessa joukko koordinaatti- ja korkeustietoja, joita voidaan käyttää mallien hyvyyden ja tietyn geomorfologisen ilmiön arvioinnissa. Mallien georeferointitarkkuutta voidaan arvioida sekä GCP-verkoston GPS -tiedoilla automaattisesti SfM-prosessin osana sekä itsenäisillä, malliin kuulumattomilla paikkatiedoilla. Lisäksi SfM-prosessin pistepilveä ja DEM:ä voidaan verrata toisilla kuvantamis- ja mallinmuodostustavoilla tehtyjen mallien kanssa (Harvin & Lucieer 2012; Hugenholtz ym. 2013; Dietrich 2014; Lucieer ym. 2014; Agüera-Vega ym. 2016; Ishiguro ym. 2016; Kršák ym. 2016; Tonkin & Midgley 2016).

Jo vuonna 2013 Hugenholtz ja kumppanit kiinnittivät huomiota geomorfologisten muotojen havaintomahdollisuuksiin ja SfM:n mallien tarkkuuden arviointiin. He testasivat saadun mallin luotettavuutta laatimalla SfM-prosessilla mallin, joka sisälsi kasvipeitteen sekä mallin, jossa kasvipeite oli manipuloitu pois. He käyttivät georeferointiin yhteensä 28 kappaletta GCP:ia kuvauskorkeuden ollessa 200 metriä ja saatujen mallien validointiin he määrittivät 99 itsenäistä GPS-pistettä. Mallien hyvyyttä arvoitiin vertaamalla korkeusero itsenäisten GPS-pisteiden ja mallin kyseisen kohdan välillä. Saatujen erotusten perusteella laskettiin horisontaalinen ja vertikaalinen RMSE sekä korkeuserovirheen keskiarvo, mediaani ja keskihajonta, jotka olivat järjestyksessä 5 cm, 3 cm ja 29 cm maksimivirheen ollessa 76 cm. Horisontaalinen RMSE oli 18 cm ja vertikaalinen RMSE ilman kasvillisuutta 29 cm. Suurin osa virheistä oli positiivisia, eli saatu malli lepäsi todellisen pintarakenteen yläpuolella. Tutkijat epäilivät, että tämä saattaa johtua kasvillisuuden aiheuttamista poikkeamista tarkkuutta mitatessa.

Vuotta aikaisemmin Harvin ja Lucieer (2012) vertasivat georeferoitua pistepilveä malliin kuulumattomilla GPS-paikkatiedoilla. He paikansivat 90 kappaletta GCP:tä ja tekivät kuvauslennon 50 metrin korkeudella, eli 150 metriä matalammalla kuin Hugenholtz ym. vuoden 2013 tutkimuksessa. Harvin ja Lucieer (2012) totesivat, että georeferoitu pistepilvi voidaan tuottaa 2,5–4 cm:n tarkkuudella. Saatu malli on siis tarkempi kuin Hugenholtzin ym. (2013) vastaava ja verrattavissa James ja Robsonin

(2012: 6) rantatörmän eroosion mallintamisen tuloksiin. He mittasivat ensimmäisen SfM-mallinsa georeferenssin RMS-virheeksi 3,7 cm. Tutkimuksissa oli kuitenkin mallin arvioinnin ohella tavoitteena tarkastella lopullisten tuotteiden visuaalista tarkkuutta ja tehdä havaintoja siitä, kyetäänkö SfM:lla tuotetuista malleista erottamaan pinnanmuotoja. Hugengolz ym. (2013) kykenivät erottamaan dyynialueilta harvan kasvillisuuden alueita sekä tiettyjä biogeomorfologisia muotoja. Samoin Harvin ja Lucieer (2012) toteavat, että SfM:lla kyetään havainnoimaan senttimetrin muutoksia rannan eroosiossa lentokorkeuden ollessa 50 metriä.

Huomattavasti matalammalta suoritettu kuvaus tuotti Dietrichin (2014) tutkimuksessa tarkemman SfM-mallin. Hän pääsi 4,5 metrin korkeudelta kuvatus aineistonsa kanssa tarkkuuteen, jossa validointiaineistolla testattujen mallien osalta RMS-virhe oli keksimäärin vain 0,6 cm keksihajonnan ollessa 0,99 cm. Hän sisällytti SfM-prosessiin yhteensä 20 GCP-pistettä ja evaluoi aineiston käyttäen yhteensä 250:aa itsenäistä GPS-pistettä. Saatujen mallien laskemisessa mukana olevien GCP:ien avulla, siis ilman itsenäistä validointidataa, lasketuksi RMS-yhteisvirheeksi Dietrich (2014) sai yhdeksän tuotteen osalta senttimetriluokan virheet vaihteluvälin ollessa 1,2 cm – 2,3 cm. Saatuja malleja verrattiin edelleen TLS:n (Terrestrial laser scanning) kautta tuotettuun malliin. Tutkimuksessa ilmeni, että tutkimusalueesta 8 % oli tilastollisesti merkitsevästi erilainen verrattaessa SfM- ja TLS-malleja keskenään. Samoin kuin Dietrich (2014), myös Kršák ym. (2016) käyttivät SfM-mallin validointiin georeferenssin lisäksi toisella menetelmällä tehtyä mallia. He käyttivät SfM-DEM-mallin datanhankinnassa 35 metrin lentokorkeutta GCP-pisteitten lukumäärän ollessa 10. Edelleen he vertasivat SfM-mallin tarkkuutta itsenäisten GPS-pisteitten dataan. Korkeuden osalta erot itsenäisen paikkatiedon ja SfM-mallin välillä olivat -0,9 cm:n ja 10,8 senttimetrin välillä. Lisäksi RMSE GCP:itten osalta oli 4,79 cm.

Kohtalaisen lähellä samaa kuvauslentokorkeutta kuin Kršák ym. (2016) käyttivät aiemmin myös Lucieer ym. (2014). Heidän tavoitteenaan oli tutkia maanpinnan vyörymistä neljän kuukauden aikavälillä käyttäen hyväksi SfM-tekniikkaa. Kenttätöiden osalta lentokorkeus kuvanhankinnassa oli 40 metriä kahdella eri lentokerralla. Tuotettujen DEM:ien hyvyttä arvoitiin edelleen vertaamalla mallin

paikkatietoa itsenäiseen paikkatietoon. He asettivat yhteensä 24 GCP:tä ja mittasivat 39 GPS-pistettä validointia varten. Kahden eri SfM-tuotteen GCP:itten RMSE oli 3,6 cm ja 7,8 cm. Vain toista mallia verrattiin itsenäiseen paikkatietoon, jolloin RMSE oli 7,4 cm, keksiarvo virheessä 6,1 cm, minimi 0,1 ja maksimi 19,8 cm. Lucieerin ym. (2014) tulos osoittaa, että samoilla kenttätöiden järjestelyilläkin lopullisten mallien tarkkuus saattaa vaihdella. Tässä tapauksessa GCP:itten osalta RMSE oli 4,2 cm ilman ulkopuolista vertailuaineistoa. Tonkin ja Medgley (2016) tutkivat juuri GCP:ien määrän merkitystä SfM-mallien tarkkuuteen käyttäen mallien arvointiin itsenäisiä GPS-mitattuja paikkatietoja. He käyttivät 100 metrin lentokorkeutta ja vaihtelivat GCP:ien määrää eri SfM-malleissa kolmen ja 101:n välillä. SfM-mallien tarkkuus parani, mitä enemmän mukaan otettiin GCP-pisteitä. Vertikaalinen RMSE vaihteli kolmen GCP:n 15,6 cm:n ja 101:n GCP:n 5,9 cm:n välillä ollen sitä pienempi, mitä enemmän GCP:itä malliin laskettiin mukaan. Tutkimustulos on linjassa James ja Robsonin (2012) havaintojen kanssa GCP:ien määrän positiivisesta vaikutuksesta lopullisten digitaalisten mallien tarkkuuteen.

Aguera-Vega ym. (2016) luokittelevat taas SfM-mallien georeferenssin tarkkuudet kolmeen kategoriaan perustuen GCP:tten määrään. Ulkopuolisen vertailudatan avulla RMSE on noin 6 cm GCP:itä ollessa 4–6 kappaletta, 5 cm, jos GCP:itä on 7–9 ja 3 cm, kun GCP:itten lukumäärä on välillä 10–20. He käyttivät 120 metrin lentokorkeutta ja 72 itsenäistä GPS-pistettä evaluointia varten. Saadut tulokset tukevat sekä James ja Robsonin (2012) että Tonkin ja Midgley (2016) havaintoja, mutta eivät ole linjassa Hugenholtzin ym. (2015) tulosten kanssa, jossa RMSE:t kahdella eri mallilla olivat 100 metrin lentokorkeudella ja kymmenellä GCP:llä 10,6 cm ja 9,7 cm.

Koci ym. (2017) lensivät kohdealueen kolmeen kertaan korkeuksien ollessa 99, 86 ja 97 metriä. Verratessa SfM-mallien georeferenssin virheitä laskemalla RMSE:t itsenäisen paikkatiedon avulla, saadut kokonaisvirheet olivat kyseisillä lentokorkeuksilla 2,7 senttimetriä, 1,3 senttimetriä sekä 1,5 senttimetriä. GCP:itten määrä oli vastaavasti 7, 7 ja 6 kappaletta. He vertasivat lopputuotteita edelleen LiDAR DEM:iin ja huomasivat systemaattisen virheen mäenrinteillä, joka näyttäisi olevan yhteydessä GCP:itten sijaintiin niin, että mitä kauempana vertailukohta on

GCP:stä, on virhe sitä suurempi. LiDAR-tuotteen avulla SfM-mallin luotettavuutta ovat arvioineet aiemmin myös esimerkiksi Fonstad ym. (2013). Kocin ym. (2017) saadut RMSE:t vähemmällä GCP-määrällä ovat pienempiä kuin esimerkiksi Aguera-Vegan ym. (2016) tekemä luokittelu RMSE:n suuruuden ja GCP:itten lukumäärän välillä. Huomioitava on kuitenkin Koci ym. (2017) käyttämät lentokorkeudet, jotka ovat matalampia kuin Aguera-Vega ym. (2016) käyttämät. Toisaalta Lucieer ym. (2014) käyttivät matalampaa lentokorkeutta, mutta RMSE-tulokset ovat silti suuremmat.

On tärkeää huomata, että SfM-malleja verratessa LiDAR-karttoihin tai muihin eri formaatin pintamalleihin, tarkastellaan mallin suhteellista tarkkuutta, ei absoluuttista tarkkuutta. Suhteellisuudella tässä yhteydessä tarkoitetaan sitä, että jokaiseen malliin ja mittaukseen liittyy virheitä, myös vertailuaineistoon, ja näin ollen kiinnostuksen kohteena on mallien vertailussa käytettyjen mittauspisteiden paikkatiedon poikkeavuuden säännöllisyys mallien välillä, ei niinkään absoluuttinen virhe reaali maailman paikkatietoon.

2.4. Aikaisempi tutkimus rantojen geomorfologisessa viitekehyksessä

Rannikkoalueiden tarkka rajaaminen ja määrittäminen ei ole aivan ongelmaton tai yksiselitteistä koska ne ulottuvat monille eri maantieteellisille ulottuvuuksille, esimerkiksi yksittäisille rannoille jatkuen rannikkoon ja edelleen mantereisiin rannikkoalueisiin (Huggett 2011). Rannikkoalueiden eri osista löytyy eri osakokonaisuuksia, kuten vuoroveden vaikutusalue (Bryson ym. 2013), dyynit (Mancini ym. 2013) ja rantatörmät (James & Robson 2012). Mielenkiinnon kohteena ovat myös rannikkoa muokkaavat prosessit, kuten eroosio ja rapautuminen (Cunliffe ym. 2019) tai rannan sedimenttibudjetin muutokset (Brunier ym. 2016).

Mancini ym. (2013) testaa SfM:n käyttömahdollisuuksia rannan kartoituksessa. Tarkoitusta varten luotiin digitaaliset mallit, kuten DEM rannan dyynisysteemistä. Saadun DEM:n tarkkuutta arvioitiin vertaamalla sitä TLS pistepilveen samasta kohteesta. Tulokset osoittivat, että suurimmillaan virhe oli paikallisesti 22 cm ja keskimäärin 5 cm. Mallin suuret virheet voidaan katsoa olevan yhteydessä voimakkaisiin korkeuseroihin pienellä alueella. Cookin (2016) havainnot siitä, että

voimakkaasti vaihtelevat pinnanmuodot aiheuttavat mallin tarkkuuteen epävarmuutta ovat linjassa Mancinin ym. (2013) havaintojen kanssa.

Mielenkiintoisen lisäulottuvuuden SfM:n mahdollisuuksiin saa Brysonin ym. (2013) tutkimuksesta, jonka tavoitteena on kehittää toimintamalli vuorovesirannikon topografian kartoitukseen sekä multispektrisen datan hankintaan ekologisten tutkimusten tarpeisiin. He tuottivat kyseisellä menetelmällä 3d-ortokuvat, DEM:n sekä lähi-infrapunakameralla otetuista kuvista johdetun NDVI-indeksikartan ja vertailivat, miten hyvin malleista voi havaita eri mittakaavan yksityiskohtia tai laajempia alueita kuten hiekkarannan ja kivivyöhykkeen rajan alueen tai erilaisia kuoppia ja railoja kalliossa.

Rantojen viitekehyksessä Kalacska ym. (2017) tarkastelivat SfM:n käyttömahdollisuuksia marskimaan osalta. He toteavat, että ekosysteemien toiminta riippuu kyseisillä alueilla pitkälti hydrologiasta ja kasvillisuudesta, jotka vaihtelevat korkeuden osalta jopa vain senttimetrin eroilla. LiDAR ei kykyine tuottamaan digitaalisia korkeusmalleja niin pienillä erotuksilla, joten SfM saattaisi tarjota ratkaisun tähän haasteeseen. Lisäksi perinteiset kuvausmenetelmät ovat hyvin aikaa vieviä, vaativat paljon fyysistä työtä eikä niillä näiden syiden takia kyetä laajojen alueiden tarkkaan kartoittamiseen. He kartoittivat kolme suolamarskia Kanadassa SfM:llä ja vertasivat malleja differentiaali-GPS:llä (DGPS) hankittuun itsenäiseen paikkatietoon sekä ilmakuvista (LiDAR) tehtyihin rekonstruktioihin. Kun SfM-malleja verrattiin itsenäiseen GPS:n paikkatietoon, havaittiin horisontaalitasossa 1,0–2,9 cm:n eroja korkeuserojen ollessa keskimäärin 2,7 cm. LiDAR-tuotteitten osalta paikkatietovertailu osoitti suurempaa hajontaa suhteessa DGPS-dataan. SfM-mallien erotuskyvyksi saatiin 2,3 cm ja tällä tarkkuudella kyettiin erottamaan geomorfologisia muotoja, joita LiDAR:lla tehdyistä malleista ei kyetä löytämään. Näitä olivat esimerkiksi pienet vesialtaat ja virtausuomat, jotka kuvaparivertailulla erottuivat SfM-kuvista toisin kuin LiDAR-kuvista.

Kalacska ym. (2017) toteavat, että SfM:llä on paljon potentiaalia marskimaitten geomorfologian kartoituksessa ja mallinnuksessa. Erotuskyvyltään senttimetriluokan mallit antavat mahdollisuuden kasvillisuuden levinneisyyden arviointiin suhteessa

alueen korkeuseroihin sekä pieniin ojiin ja muihin vastaaviin pinnanmuotoihin. Edelleen mallit antavat mahdollisuuden arvioida marskimaiden vasteita merenpinnan nousuun ja vedenlaadun muutoksiin.

Alueellisen rajauksen lisäksi mielenkiinnon kohteena on tietyt maisemaa muokkaavat prosessit, kuten eroosion eri mittakaavat rannikolla. Cullen ym. (2018) tutkivat SfM:n potentiaalia havaita mikrotason (millimetritaso) eroosiota rantakivistä, jotka sijaitsevat matalimman ja korkeimman rantaviivan tason välissä ja ovat näin ollen alttiita eri eroosiota aiheuttavien mekanismien vaikutukselle. Asiaa tutkittiin neljän koepalana toimivan kiven avulla, joihin oli koneellisesti tehty eri tason kulutuspintoja. Kivet kuvattiin ennen ja jälkeen ja kuvista laadittuja DEM:a verrattiin keskenään, jotta mahdolliset havaitut erot saataisiin nostettua esiin. Kohteet kuvattiin läheltä käsivarakameralla ja kuvat käsiteltiin SfM-prosessin keinoin. Saadut tulokset osoittivat, että SfM soveltuu myös millimetritason muutosten kartoittamiseen. Toisaalta jos tutkittavan pinnan rosoisuus kasvaa, alenee SfM:n mahdollisuudet havaita muutoksia. Myös tietyt varjostuksen kohdat aiheuttivat epävarmuutta muutoksen havainnointiin, mutta vertaamalla tuloksia ortokuvaan voidaan väärin johtopäätösten mahdollisuutta vähentää.

Samoin veden aiheuttamaa eroosiota, mutta suuremmassa mittakaavassa tutkivat myös James & Robson (2012) tarkastellessaan rannan jyrkänteen eroosion määrää vuoden aikana. He havaitsivat, että rantatörmän vetäytymisvauhti oli noin 0,7 metriä vuodessa virhemarginaalin ollessa puoli metriä. Tähän havaintoon verrattuna Cunliffen ym. (2019) havainnot rannan eroosion kasvaneesta nopeudesta ovat dramaattiset, kuten johdannossa olevasta kappaleesta voidaan päätellä.

Esimerkin sedimenttibudjetin vaihtelun mallintamismahdollisuuksista tarjoavat Brunier ym. (2016). He selvittivät SfM:lla ja ilmakuvauksella Cayennessa Ranskan Guayanassa sijaitsevalla rannalla kolmella vuoden aikana toteutetuilla kuvauslennoilla rannan morfologisia muutoksia tavoitteena saada laskettua rantaympäristön sedimenttibudjetissa tapahtuvat muutokset. Kuvauslentojen korkeus oli keskimäärin 275 metriä ja kuvien päällekkäisyys lentosuunnassa 85 % sekä sivusuunnassa 50 %. GCP:t olivat tasaisesti 100 metrin välien tutkimusalueella.

Mallien tarkkuuden arvioimista varten tutkijat keräsivät GPS-paikkatietopisteitä. Aineistosta tutkija laativat ortokuvat sekä digitaaliset pintamallit. Mallien virhe oli vähemmän kuin +/- 10 cm vertikaalisuunnassa kuitenkin niin, että maksimivirhe oli 20 cm, joka oli yhteydessä kasvillisuuden ja vedenpinnan aiheuttamaan epävarmuuteen. Rannanmuotoja, joiden koko oli kymmenen senttimetrin luokkaa, kyettiin tunnistaman kohtuullisen homogeenisesta rannan topografiasta ja heikosta kuvien kontrastista riippumatta. Lisäksi rannan sedimenttibudjetin osalta SfM-mallien perusteella laskettiin, että rannan pohjoispäästä 66,000 m³ sedimenttiä liikkui pois, josta 22,000 m³ siirtyi rannan eteläosaan.

3. RANNAN GEOMORFOLOGIA

Meren rannat voidaan Huggettin (2011) mukaan jakaa pääpiirteissään kolmeen pääkategoriaan; aaltojen hallitsemiin, vuoroveden hallitseviin sekä vuoroveden modifioimiin rantoihin. Nämä voidaan edelleen jakaa alakategorioihin. Aaltojen hallitsemilla rannoilla aaltojen korkeus ylittää säännöllisesti 2,5 metriä ja hallitseva sedimenttityyppi on hieno hiekka. Vuoroveden hallitsemilla rannoilla tulvavuoksen korkeus on 10–50 kertaa suurempi kuin keskimääräinen aallonkorkeus. Vuoroveden modifioimilla rannoilla vuoksen korkeus vaihtelee ja tulvavuoksen korkeus on kolmesta kymmeneen kertaa keksimääräisen aallon korkeus.

Ensimmäisessä vuoroveden modifioiman rannan alakategoriassa aaltojen korkeus on keksimäärin 0,45 metriä vuoroveden korkeuden vaihtelun ollessa jopa kymmenen kertaa aallon keksimääräinen korkeus, eli 4,5 metriä. Profiililtaan kyseiset rannat ovat suhteellisen jyrkkiä ja koostuvat keskimäärin hiekasta, jonka reakoko on noin 0,45 mm. Toisena alakategoriana ovat rannat, jolla aallonkorkeus on keksimäärin noin 0,7 metriä. Nousuveden aikana aallot kulkevat rannan törmien yli rikkomatta niitä ja rannoilla tavataan eriasteisia uomia ja noroja. Kolmantena alaluokkana ovat rannat, joissa aallonkorkeus on keskimäärin 0,6 metriä ja rannat koostuvat hienosta hiekasta. Alemman ja ylemmän vuoroveden välisen vyöhykkeen leveys on suuri ollen jopa 200–400 metriä leveydeltään. Rantojen profiili on matala (Huggett 2011).

3.1. Rannan profiili

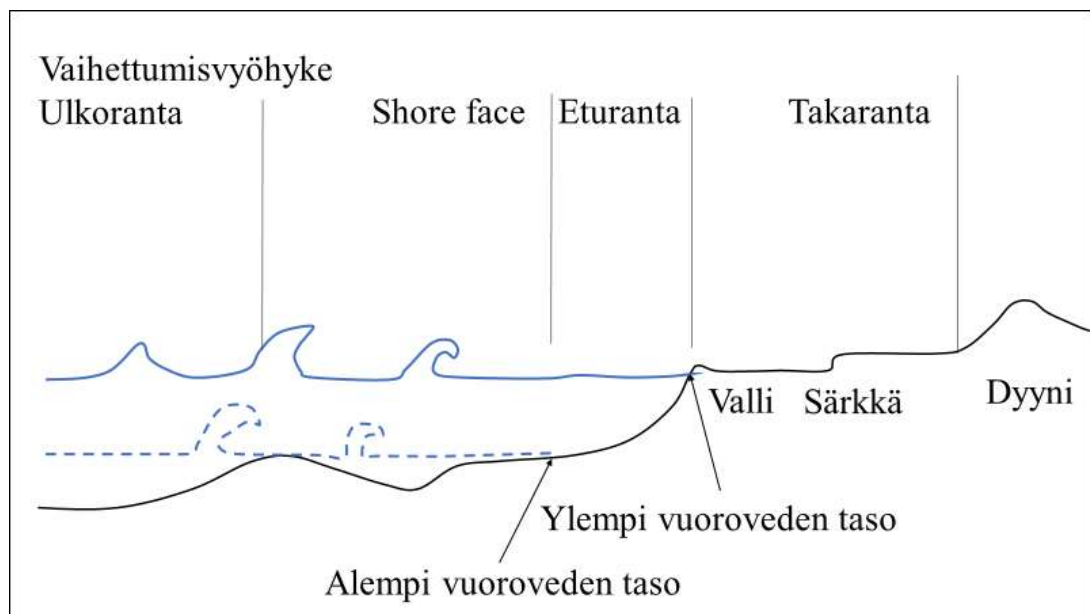
Tyypillinen meren ranta voidaan profiilinsa puolesta jakaa useaan osaan. Jokaisella rannalla on kuitenkin luonteenomaiset yksityiskohtansa, kuten edellä todetaan, ja niiden ulkoasuun vaikuttavat esimerkiksi vuoroveden suuruus, rannan materiaali, aaltojen toiminta ja rannan profiilin jyrkkyys (Reineck & Singh 1980: 345; Uusinoka 1980: 103; Huggett 2011: 359). Ranta-alue ja sitä edeltävä meren edusta voidaan Davidson-Arnottin (2009: 184–186) mukaan jakaa kolmeen suureen osakokonaisuuteen, joista ensimmäinen käsittää vyöhykkeen mereltä kohti manteretta päättyen alueeseen, jossa aallot koskettavat meren pohjaa. Kolmantena alueena on rantajärjestelmä, joka ulottuu keskimääräisestä matalasta vuoroveden tasosta aallonvaikutuksen maarajan yläosaan. Näiden kahden alueen väliin jää

matalimman keskimääräisen vedenrajan ja aaltojen murtumispisteen välinen vyöhyke. Jaottelu muistuttaa suuresti Uusinokan (1980) mainitsemia hydrodynaamisia vyöhykkeitä sillä erotuksella, että Uusinoka (1980) mainitsee neljä hydrodynaamista vyöhykettä. Näistä vyöhykkeistä on kirjoitettu edempänä liittyen rannanläheisen veden kiertoliikkeeseen osana rannan sedimenttien kerrostumista. Maalta merelle päin luettuna sekä Reineck ja Singh (1980: 345), Uusinoka (1980: 103) että Huggett (2011: 361) jakavat rannan vain vähäisin eroin dyynialueeseen, taaempaan rantaan tai takarantaan, eturantaan, shore face -vyöhykkeeseen, vaihettumisvyöhykkeeseen sekä ulkorantaan. Varsinainen ranta, beach, käsittää sekä etu- että takarannan (kuva 3).

Takarannan merenpuoleinen raja määräytyy ylemmän keskimääräisen vuoroveden korkeuden kohdan mukaan. Vesi ei näin ollen pääse takarannalle muutoin kuin myrskyjen aikaan. Taaemman rannan alueella voi siten esiintyä harjanteita ja valleja sekä veden uurtamia juovia tai uria, altaita sekä mataliin kohtiin kerrostunutta silttiä, liejua ja leviä. Takaranta päättyy mantereen puolella yleensä dyynin alareunaan. Eturannan ja takarannan vaihettumiskohtaan kasautuu yleensä myrskyn kasaama valli tai särkkä, joka suojaa takarantaa aalloilta korkean vuoroveden aikana. Rantaprofiilin kerroksellisuuden osalta takarannan alue on rannan osista kaikkein epäsäännöllisin, koska alue on suurimman osan ajasta tuulen vaikutuksen alaisena. Tuuli poistaa kuivettuneen aineksen synnyttäen deflaatiopintoja. Myös uudet myrskyt sekoittavat takarannalle syntyneet pienet rakenteet. Takarannalta pois valuva vesi synnyttää erilaisia pintavalumamerkkejä (Reineck & Singh 1980: 345–346; Uusinoka 1980: 103–109).

Eturannan rakenne on yleensä säännöllinen kerrosten ollessa pinnan myötäisiä tai rannalle päin viettäviä. Alemman eturannan osalta rakenne on epäselvempi. Kuitenkin, koska koko eturanta on vuoroveden vaikutuksen alaisena, sen pinnalla näkyy usein erilaisia valumajälkiä ja eri suuruisia aallonmerkkejä, kuten esimerkiksi säännölliset tai epäsäännölliset oskillaatiomerkit. Luonteenomaisia ovat myös aaltojen muokkaamat särkät ja painanteet, jotka tosin tasoittuvat myrskyjen aikana. (Uusinoka 1980: 103–108).

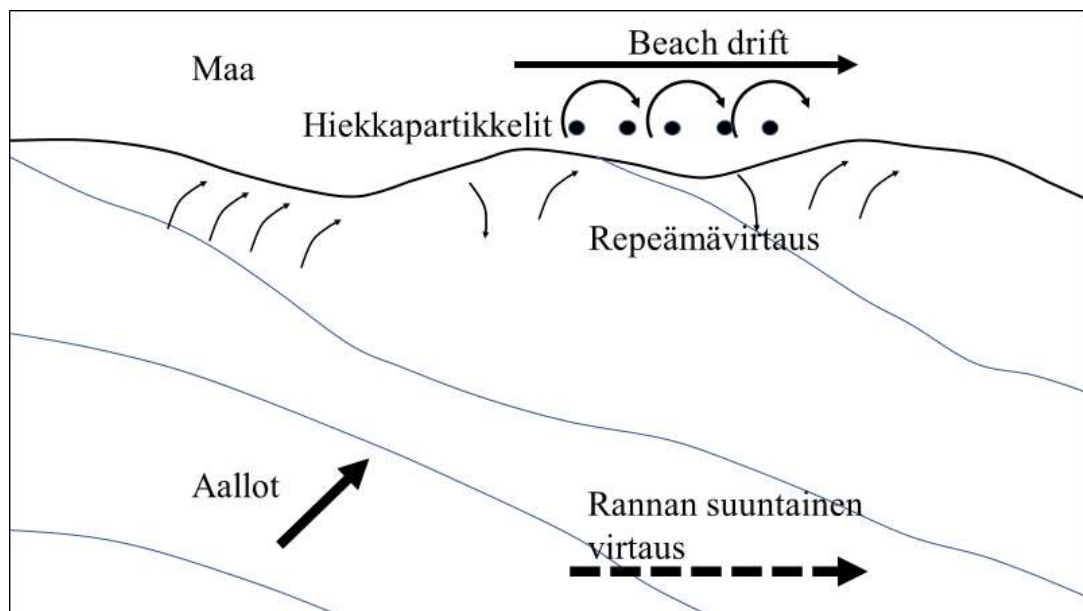
Shore face -vyöhyke on kokonaan veden alla. Vyöhykkeen sedimentin raekoko pienenee kohti ulappaa. Myös bioturbaation (eliöiden sekoittama rakenne) määrä kasvaa ulapalle päin mentäessä. Shore face -vyöhykkeen rannanpuoleinen raja on kohdassa, jossa vähätuulisella säällä aallokko koskee vielä pohjaan. Shore face -vyöhyke muuttuu ulapalle päin mentäessä vaihettumisvyöhykkeeksi ja edelleen tämän jälkeen ulkorannaksi (Uusinoka 1980: 103–108).



Kuva 3. Vuorovesirannan profiili. Ranta voidaan jakaa dyynialueeseen, takarantaan, eturantaan, shore face -alueeseen, vaihettumisvyöhykkeeseen ja ulkorantaan. Mukailtu Reineck & Sighn (1980), Uusinokan (1980) ja Huggettin (2011) mukaan.

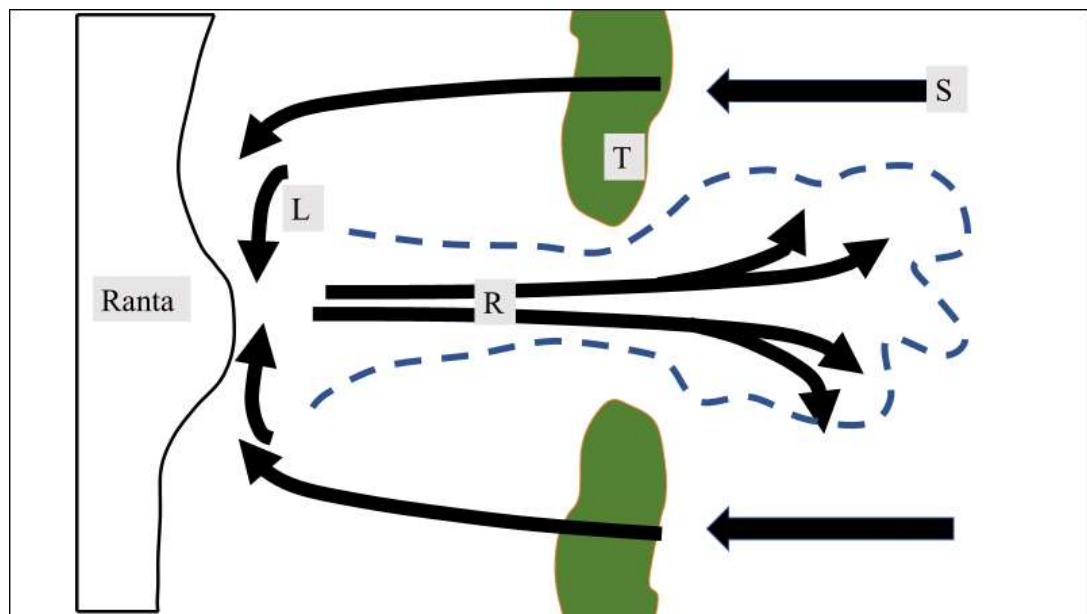
3.2. Sedimentin kulkeutuminen

Vuorovedet ja aallojen voima siirtävät rannikon vesiin kulkeutuneita sedimenttejä kohti rantaa (kuva 4). Ensisijainen liike sedimenteillä on kuitenkin rantaviivan suuntaisesti. Tätä liikettä kutsutaan materiaalin raananmyötäiseksi kulkeutumiseksi (*beach drift*) (Uusinoka 1980; Huggett 2011) tai materiaalin rannansuuntaiseksi kulkeutumiseksi (*longshore drift*) (Reineck & Singh 1980). Voimakkaimmillaan tämä ilmiö on, kun aallot osuvat rantaan noin 30 asteen kulmassa ja kun veden takaisinvirtaus on kohtisuoraan merelle päin rantaviivaan nähden. Ilmiötä edesauttaa myös rajoitettu, vuorovesivaihtelu (alle 4 metriä) ja suhteellisen matala rannan gradientti. Tämän seurauksena veden mukana kulkevat partikkelit liikkuvat rannan suuntaisesti hitaasti aallojen liikesuunnan mukaisesti kerrostaen sedimenttejä kohtiin, joissa sedimenttien liike estyy. Näihin kohtiin alkaa kertyä sedimenttejä ja edelleen havaittavia muotoja (Reineck & Singh 1980; Uusinoka 1980; Huggett 2011: 353–354).



Kuva 4. Beach drift -ilmiö, jossa rannan suuntaiset virtaukset kuljettavat sedimenttipartikkeleita. Mukailtu Huggetin (2011) mukaan.

Toisena pääasiallisena sedimenttiä kasaavana ja rannan rakenteita muokkaavana veden virtausmekanismina on repeämävirtaukseksi kutsuttu ilmiö (kuva 5). Repeämävirtaukset kuljettavat rannalle saapuneen veden takaisin ulapalle. Repeämävirtaukset muokkaavat vedenalaisia särkkiä ja valleja kuluttamalla niihin uomia kohtiin, joissa vesi virtaa rannalta pois. Materiaali kasaantuu viuhkamaiseen muotoon syvemmälle veteen jokseenkin säännöllisin välein toistuviksi kuvioiksi alueille, joissa veden virtausnopeus laskee. Repeämävirtauksia tavataan rannoilla, joiden syvyys on alle 5 metriä. Repeämävirtaus on osa veden kierto liikettä, johon kuuluu lyhyehköllä matkalla tapahtuva veden rannan suuntainen liike sekä veden takaisinvirtaus ulapalle (Uusinoka 1980: 101–102; Huggett 349, 364).



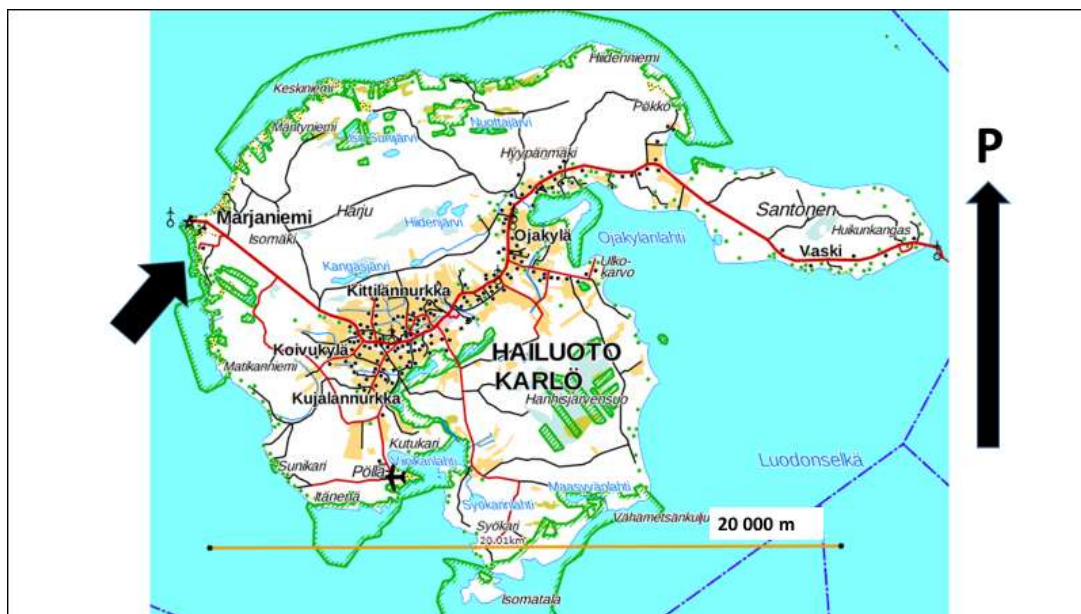
Kuva 5. Repeämävirtauksen havainnekuva. S = maalle päin suuntautuva aaltorintama, joka kuljettaa mukanaan sedimenttejä, T = Tyrskyn muodostumisvyöhyke / vedenalainen valli, L = rannan suuntainen virtaus, R = repeämävirtaus. Katkoviivalla on merkitty repeämävirtauksen kuljettaman materiaalin kasaantumisalue.

3.3. Aallonmerkit

Aallonmerkit syntyvät veden edestakaisen liikkeen seurauksena ja ne ovat muodoltaan joko symmetrisiä tai epäsymmetrisiä. Symmetriset aallonmerkit syntyvät silloin, kun aaltojen edestakainen liike säilyy säännöllisenä. Epäsymmetrisiä aallonmerkkejä tavataan rannoilla, joissa rannan profiili on loiva ja noin ollen vedenpinta on pitkältä matkalta matalalla sekä aallon liike ja näin ollen partikkeleiden kuljetus mereltä maata kohti on nopeampi kuin veden virtaus takaisin kohti merta. Symmetristen aallonmerkkien sivut ovat säännölliset, kun taas epäsymmetristen aallonmerkkien sivut ovat epäsymmetriset. Aallonmerkkien syntyyn vaikuttavat aaltojen ominaisuudet kuten nopeus, syvyys ja aaltojen välinen etäisyys (Reineck & Singh 1980; Uusinoka 1980).

4. TUTKIMUSALUE

Tämän tutkimuksen tutkimusalueena on Hailuodon saaren (kuva 6) Marjaniemen rannan osa saaren länsipäässä välittömästi leirintäalueen eteläpuolella ja Hannuksennokan pohjoispuolella Hanuksenrannanlammen tasalla. Tarkat tutkimusalueet ovat esitetty kuvassa 7.



Kuva 6. Tutkimusalue sijaitsee nuolen osoittamassa paikassa Marjaniemen eteläpuolella (Kartta: InfoGis.fi. © Maanmittauslaitos).

Hailuodon alueella alimpana kallioperässä on peruskallio, joka koostuu kiteisestä kallioperästä ja on muodostunut joko arkeaisella kaudella (4 000–2 500 miljoonaa vuotta sitten) tai paleoproterotsooisella kaudella (2 500–1 600 miljoonaa vuotta sitten). Saaren länsiosassa peruskallio sijaitsee 130–200 metrin syvyydessä ja saaren itäosassa yli 500 m:n syvyydessä. Tämä viittaa siihen, että peruskallio muodostaa jyrkän portaan saaren keskiosassa. Neoproterotsooisella kaudella (1 000–542 miljoonaa vuotta sitten) peruskallioon syntyneeseen ruhjelaaksoon on kerrostunut karbonaattipitoinen silttikivi. Muodostuman paksuus on Hailuodon länsiosassa 100–150 metriä ja saaren itäosassa, jossa peruskallion pinta on syvemmillä, paksuus on 400–500 metriä. Kallioperän silttikiven päälle on kerrostunut kvartäärikauden (2,6 miljoonaa vuotta sitten – nykypäivä) loppuvaiheissa jäätikkö- ja jäätikköjokisyntyisiä sedimenttejä. Luultavasti kerrostuminen on tapahtunut

viimeisimmän jääkauden aikana n. 90 000–10 000 vuotta sitten. Moreeneja tavataan saaren keski- ja eteläosassa. Hailuodon pohjoisosan korkeammat alueet muodostuvat jäätikköjokisyntyisestä lajittuneesta sorasta ja hiekasta (Ahola ym. 2015: 30). Hailuodossa maankohoaminen on merkittävä maisemaan vaikuttava tekijä, joka ylläpitää jatkuvaa sukkessiokehitystä rantojen kasvillisuudessa. Myös meren virtaukset, jäät sekä tuulet vaikuttavat rantojen geomorfologiaan (Ahola ym. 2015: 30).

Tyypillisiä muodostumia Hailuodossa ovat myös aallokon kulutuksen synnyttämät rantavallit ja tuulen muovaamat dyynit. Saaren pohjoisosassa merkittävän geomorfologisen piirteen muodostaa harjujakso, joka kattaa Hailuodon pohjoisosan Marjaniemestä Hiidenniemeen. Virpiniemin alueen deflaatiotasanteista tuuli on pyyhkinyt irtaimen aineksen pois. Laidunnuksen vuoksi nummelle ei ole päässyt muodostumaan hiekan liikettä sitovaa kasvillisuutta. Perinteisen laidunnuksen loputtua nummet ovat kasvamassa umpeen. Hailuodon geologian kannalta merkittävimpiä piirteitä ovat saaren pohjoisosan harjujakso, aallokon sekä tuulen synnyttämät rantavallit ja dyynit, nuoret maankohoamisrannikon suot, merestä kuroutuneet pienvedet sekä perinteisen laidunnuskulttuurin ja tuulen synnyttämät nummet. Maankohoaminen pitää yllä jatkuvaa rantakasvillisuuden sukkessiokehitystä. Lisäksi merenrannan ankarat olosuhteet muokkaavat rantoja. Saaren länsipäässä Marjaniemessä, rannan tuntumassa on avoin, noin yhden neliökilometrin laajuinen hiekkakenttä. Siellä on kaksi 1,5 – 2 metriä korkeaa, 5 – 10 metriä leveää ja 500 – 600 metriä pitkää rannan suuntaista alkiodyyniä noin 50 metrin päässä vesirajasta. Alkiodyynillä kasvaa rantavehnnää (*Elymus arenarius*) ja rönssyrölliä (*Agrostis stolonifera*), ja ne sitovat juurillaan hiekkaa. Niiden takana on 500 metriä pitkä ja 300 metriä leveä deflaatioalue, jolle tyypillisiä kasveja ovat merivihvilä (*Juncus balficus*), lampaannata (*Festuca ovina*) ja ahosuolaheinä (*Rumex acetocella*). Deflaatioalueen takana alkavat ensimmäiset stabiloituneet ja metsittyneet poikittaisdyynit (Johansson ym. 2000: 42; Ahola ym. 2015: 30).



Kuva 7. Ensimmäisen kuvauslennon tutkimusalue vasemmalla ja toisen lennon oikealla. Ensimmäisen kuvauslennon pinta-ala kattaa myös toisen kuvauslennon pienemmän pinta-alan, joten oikeanpuoleisessa kuvassa on osa rannasta, joka näkyy vasemmassa kuvassa kuvan keskellä.

5. TUTKIMUSMENETELMÄT

Tämän pro gradu -tutkielman tutkimusmenetelmät sekä tutkimuksen yleinen rakenne noudattavat samaa periaatetta kuin esimerkiksi Harvin ja Lucieerin (2012) ja Lucieerin ym. (2014) tutkimuksissa. Tutkimuksen rakenne voidaan jakaa kenttätöihin, eli datanhankintaan, datan prosessointiin SfM-periaatteen mukaisesti sekä mallien jälkikäsittelyyn (vrt. kuvat 1 ja 2).

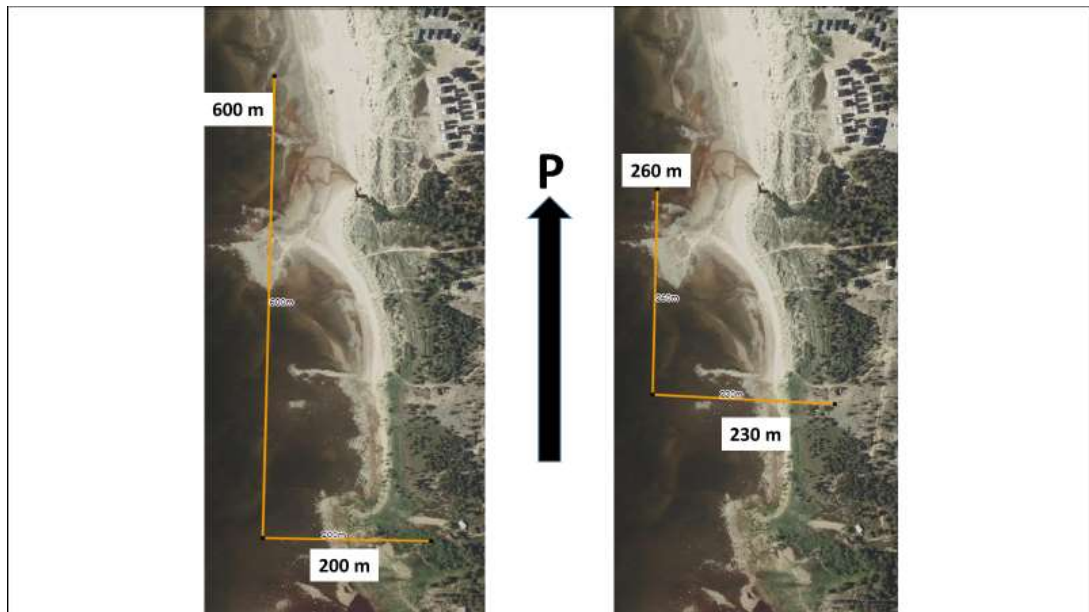
5.1. Kenttätyöt

Kenttätyöt toteutettiin Hailuodossa 2018. Kenttätöihin kuului kahdeksan GCP:n paikan asettaminen ja mittaaminen tutkimusalueelle SfM-prosessin aikana tehtävää mallin georeferointia varten. Merkinä käytettiin keltamustaa neliön muotoista muovista maahan laskettavaa kangasta. Jokaisen GCP:n paikka määritettiin käyttäen EMLID Reach RS+ GPS-yksikköä, johon kuuluu tukiasema sekä liikuteltava mittausasema, jolla GCP paikka määritettiin (kuva 8). Tukiaseman paikkavirheeksi mittauksen aikana saatiin 0,4 mm ja liikuteltavan mittausaseman paikkavirheeksi 3,6 cm. GCP:ien määrittämisen jälkeen suoritettiin itse kuvantamislennot.



Kuva 8. Tarkkuusmitattujen paikkatietopisteitten (GCP) määrittämiseen käytettiin tarkkuus-GPS:n paikkatietoa. Vertikaalinen korkeus saatiin vähentämällä saadusta mittauskorkeudesta mittausinstrumentin korkeus. Vasemmalla on GPS-paikkannin asetettuna GCP:n päälle paikan määrittämistä varten. Oikealla on esimerkkikuva GCP:sta. Jokainen kuva, jossa kyseinen GCP näkyy, sidotaan GCP:n keskipisteen avulla tiettyyn reaali maailman koordinaatiopisteeseen.

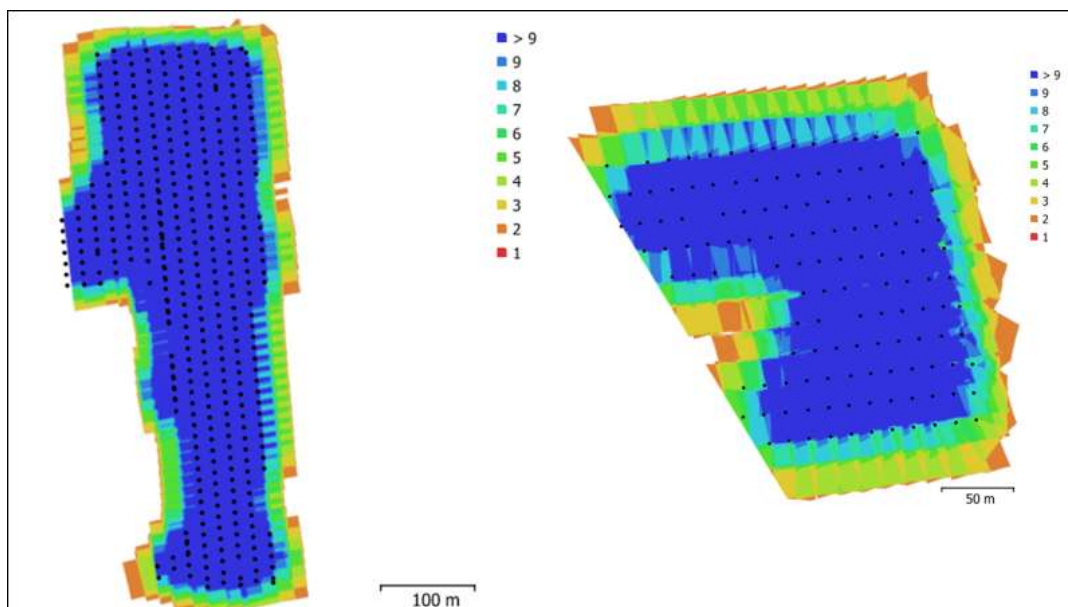
Kuvauslentoja tehtiin kaksi kappaletta ensimmäisen lennon rannan osuuden ollessa noin 600 m x 200 m ja toisen osuuden 260 m x 230 m (kuva 9). Ensimmäisellä lennolla kaikkia kahdeksaa GCP:tä käytettiin mallin georeferointiin ja toisella lennolla ja pienemmällä pinta-alalla kuvausalaan otettiin neljä GCP:tä sekä toisella aineiston analysointikerralla viisi GCP:tä.



Kuva 9. Ensimmäisen kuvauslennon tutkimusalue vasemmalla ja toisen lennon oikealla (Kartta: InfoGis.fi. © Maanmittauslaitos).

Kuvauslentoihin käytettiin kameran lavettina molemmilla kerroilla Phantom 4 Pro UAV -lennokkia. Laite painaa 1388g ja sen diagonaalipituus ilman propelleja on 350 mm. Kamerana käytettiin Phantom 4 Pro:n omaa sensoria 1”CMOS, jonka linssinä on FOV 84° 8.8 mm/24 mm (35 mm format equivalent) f/2.8 - f/11 auto focus at 1 m - ∞. Resoluutio kameralla on 5856 x 3630 ja polttoväli 8,8 mm. Pikselikoko on 2,61 x 2,611 mikrometriä. Molemmilla lentokerroilla lentolaite ohjelmoitiin lentämään määritellyn tutkimusalueen yli automaattisesti ja ottamaan kuvia niin, että sekä lentosuuntainen ja sivuttaissuuntainen kuvien päällekkäisyys on 80 %. Määritelty lentokorkeus ensimmäisellä lennolla oli 59 metriä ja toisella kerralla 53,7 metriä. Kameraa ei oltu kalibroitu kuvauksissa ennakoivasti, vaan kalibrointi tapahtuu automaattisesti datan prosessoinnin vaiheessa. Kun tutkittava alue, lentokorkeus sekä haluttu kuvien päällekkäisyys oli määritelty, lentolaitteen

kuvantamisohjelma laski lentoreitin ja kuvien ottamisen frekvenssin automaattisesti (kuva 10). Ensimmäisellä lennolla kerättiin yhteensä 408 kuvaa ja toisella lennolla 132 kuvaa.



Kuva 10. Molempien datankeräyslentojen aikana otettujen valokuvien kuvanottokohdat ovat merkitty mustilla pisteillä. Lisäksi värikoodilla on merkitty, montako päällekkäistä kuvaa kyseisessä kohdassa on ollut käytössä. Huomaa ero alueiden mittakaavassa.

5.2. Kuvankäsittely ja aineiston prosessointi

Molempien lentojen kuvapaketit käsiteltiin käyttäen Agisoft Photoscan 1.4.4. build 6848 -versiota. Samaa kuvienkäsittelyohjelmaa, joskin eri versioita ovat käyttäneet muun muassa Lucieer ym. (2014) maanvyöryn kartoituksessa, Prosdocimi ym. (2015) eroosiotutkimuksessa, Woodged ym. (2013) tutkiessaan mahdollisuutta kartoittaa joenuomaa SfM-tekniikalla, Koci ym. (2017) SfM-mallien tarkkuutta arvoivassa tutkimuksessa ja Mallalieu ym. (2017) tutkiessaan jäätikön dynamiikkaa. Ensimmäisen lennon kuvat käsiteltiin käyttäen kuvien linjaamisessa ja kuvien sitomisessa toisiinsa geneeristä esivalintaa jättäen pois referenssiennaltavalinnan. Toisen lennon osalta käytettiin myös referenssiesivalintaa. Geneerisessä esivalinnassa päällekkäiset kuvaparit tunnistetaan käyttäen automaattisesti matalampaa tunnistustarkkuutta prosessin nopeuttamiseksi. Referenssiesivalinnassa

kuvaparien tunnistamiseen käytetään kameran arvioitua paikkaa tietyn kuvan ottamisen hetkellä, jolloin mahdollisten kuvaparien löytämisen apuna käytetään kuvien yksityiskohtien lisäksi kameran arvioituja sijainteja. Lopullisiin kuvien linjauksiin tällä ei kerrota olevan Agisoft PhotoScan User Manualin (2016: 13) mukaan vaikutusta. Ainoastaan kuvien esivalintaan käytetty aika vaihtelee.

Molempien lentojen kuvien linjaamisen tarkkuudeksi määriteltiin korkea (High). Harvan pistepilven mallintamisessa molempien lentojen rekonstruktion parametreissa laaduksi määriteltiin korkea (High) ja filtering mode oli Aggressive. Ensimmäisen lennon kuvien osata kuvaparien löytämiseen käytettiin aikaa 59 minuuttia 48 sekuntia sekä kuvien linjaamiseen 51 minuuttia 13 sekuntia. Toisen lennon vastaavat ajat olivat 8 minuuttia 38 sekuntia sekä 3 minuuttia 32 sekuntia. Molempien lentojen kuvasarjojen linjaamisen ja kuvaparien etsimisen avainpisteitten ylärajaksi oli määritelty 60 000 pistettä.

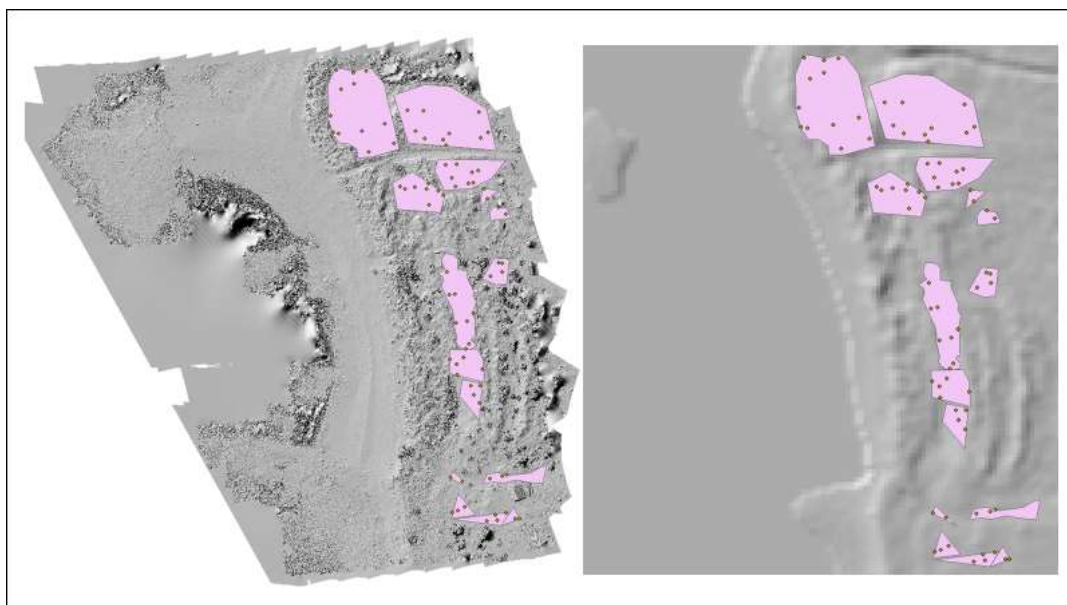
Harvan pistepilven rekonstruktioiden jälkeen molempien lentojen data sidottiin manuaalisesti mallista tunnistettavien GCP:itten (kts. kuva 8) avulla reaaliaikaisen koordinaatistoon. Koordinaattijärjestelmänä oli WGS 84 (EPSG:4326). Tämän jälkeen pistepilvirekonstruktiosta johdettiin automaattisesti DEM ja ortomosaiikki. Mallien korkeustiedot ovat GPS-korkeuksia. Automaattisen datankäsittelyn prosessin kautta johdettiin molemmista saaduista pintamalleista GCP:itten RMSE -virheet x, y ja z ulottuvuuksille jokaiselle GCP:lle erikseen sekä yhteenlaskettu RMSE-virhe.

5.3. Aineiston jatkokäsittely

Aineiston jatkokäsittely suoritettiin käyttäen ArcMap 10.6-versiota. SfM:n tuottamasta DEM:stä tehtiin rinnevarjostus -formaatin kartat sekä DEM-kartat molempien lentojen osalta. Referenssiaineistona käytettiin Maanmittauslaitoksen ilmaisesta avoimen aineistojen tiedostopalvelusta ladattua kahden metrin resoluution LiDAR-korkeusmallia samasta alueesta (karttalehtitunnus: R4234B, koordinaatisto: etrs-tm35fin). Korkeusmallin päivitystietojen perustella karttalehti on päivitetty 1.9.2015. ArcMapissa sekä referenssiaineiston että SfM-tuotteitten koordinaatisto yhdenmukaistettiin vastaamaan referenssiaineiston koordinaattijärjestelmää.

5.4. Mallien tarkkuuden arviointi

Mallien tarkkuuden arviointi toteutettiin tekemällä laadun ja luotettavuuden arviointi molempien kuvauskorkeuksien osalta. Tätä varten muodostettiin ArcMap:ssa toisen lennon SfM-rinnevarjostus formaattia karttapohjana käyttäen polygoneja, joiden sisään arvottiin sattumanvaraisille paikoille ArcMap:n random sampling -työkalulla pisteet, joiden kohdalta SfM-tuotteiden korkeustietoa verrataan Maanmittauslaitoksen korkeusmallin samojen kohtien korkeustietoon (kuva 11).



Kuva 11. Polygonit on määritelty alueilta, joissa maanpinnan muutosten on oletettu olevan vähäisiä ja joissa ei ole kasvillisuutta. Polygonien sisään on arvottu sattumanvaraisille paikoille mittauspisteet, joiden kohdalta SfM-tuotteiden korkeustietoja verrataan LiDAR-korkeusmalliin. Vasemmalla toisen lennon rinnevarjostusformaatin kuva ja oikealla LiDAR-korkeusmalli).

Polygonit valittiin paikoista, joissa geomorfologisten muutosten voidaan olettaa olevan vähäisiä, tai vähäisempiä kuin kuvausalueen muissa osissa. Näin ollen polygonit määriteltiin takarannan dyynin mantereenpuoleiselta alueelta, joissa vuoroveden vaihtelut, myrskyaallokot ja jäiden liikkeet eivät ole muuttaneet maanpinnan muotoja niin paljon kuin etu- ja takarannan alueella voidaan olettaa käyneen verratessa aluetta vuoteen 2015. Lisäksi rinnevarjostus formaatin kuvan avulla kohdat pyrittiin määrittämään niin, ettei kyseisillä alueilla näy kasvillisuutta.

Jos tarkoituksena olisi mitata rannan geomorfologian muutosta, vertailukohtien valinta etu- ja takarannalta olisi tarkoituksenmukaista. Polygoneja määriteltiin koordinaatistoon yhteensä 15 kappaletta.

Polygonien sisään arvottiin satunnaisotannalla yhteensä 77 mittauspistettä. Mittauspisteitten vähimmäisetäisyydeksi määriteltiin 2,1 metriä, koska vertailuaineistona olevan LiDAR-korkeusmallin rasterikoko on kaksi metriä. Näin ollen vältetään tilanteelta, että kaksi satunnaisesti määriteltyä pistettä polygonien sisällä tulisi mittamaan vertailuaineiston osalta samaa rasterin arvoa. Valittujen pisteiden kohdalta tuotetaan korkeustiedon molempien lentokorkeuksien datasta sekä LiDAR-aineistosta. Saatujen korkeustietojen avulla tarkastellaan Microsoft Excel-ohjelmistolla sekä IBM SPSS Statistics 25-ohjelmistolla SfM-DEM-mallien suhdetta.

Samalla laskettiin SfM-DEM-mallien ja vertailudatan välinen Spearmanin järjestyskorrelaatiokerroin ja selitysaste r^2 . Spearmanin järjestyskorrelaatiokerroin sopii myös aineistoille, joilla ei ole normaalijakaumaolettamaa ja sillä lasketaan muuttujien lineaarisen riippuvuuden voimakkuutta. Korrelaatiokertoimien arvo on välillä -1 ja 1. Etumerkki osoittaa riippuvuuden suunnan, eli sen pieneneekö vai suureneeko muuttujien arvo toisen muuttujan arvon kasvaessa. Lisäksi testataan, onko tulos tilastollisesti merkitsevä, kun otetaan huomioon havaintopisteitten määrä. Jos merkitsevyys on suurempi kuin 0,05, korrelaatio on niin pieni, että saatu tulos voi johtua sattumasta. Jos merkitsevyys on yhtä suuri tai pienempi kuin 0,05, korrelaatio poikkeaa nollasta niin paljon, ettei tulos ole enää sattumaa. Selitysasteella kuvataan sitä, kuinka paljon selitettävän muuttujan vaihtelusta voidaan regressioyhtälön avulla selittää selittävän muuttujan vaihtelulla. Toisin sanoen, kuinka paljon muuttujan vaihtelusta johtuu sen riippuvuudesta selittävään muuttujaan. Korrelaation ollessa välillä 0,4–0,6 on muuttujien välinen korrelaatio kohtuullista, välillä 0,6–0,8 se on korkea ja välillä 0,8–1,0 erittäin korkea (Ranta ym. 1994; Metsämuuronen 2005; Heikkilä 2014). Lisäksi tutkimusaineiston avulla laadittujen pintamallien absoluuttista tarkkuutta tarkastellaan vertaamalla mallien pohjalta tehtyjen DEM:ien korkeustietoja itsenäisiin, malleihin kuulumattomiin GPS-mitattuihin korkeustietoihin laskemalla RMSE.

Korkeussijainnin keskineliövirheen neliöjuuri, eli RMSE, on laskettu yhtälöllä:

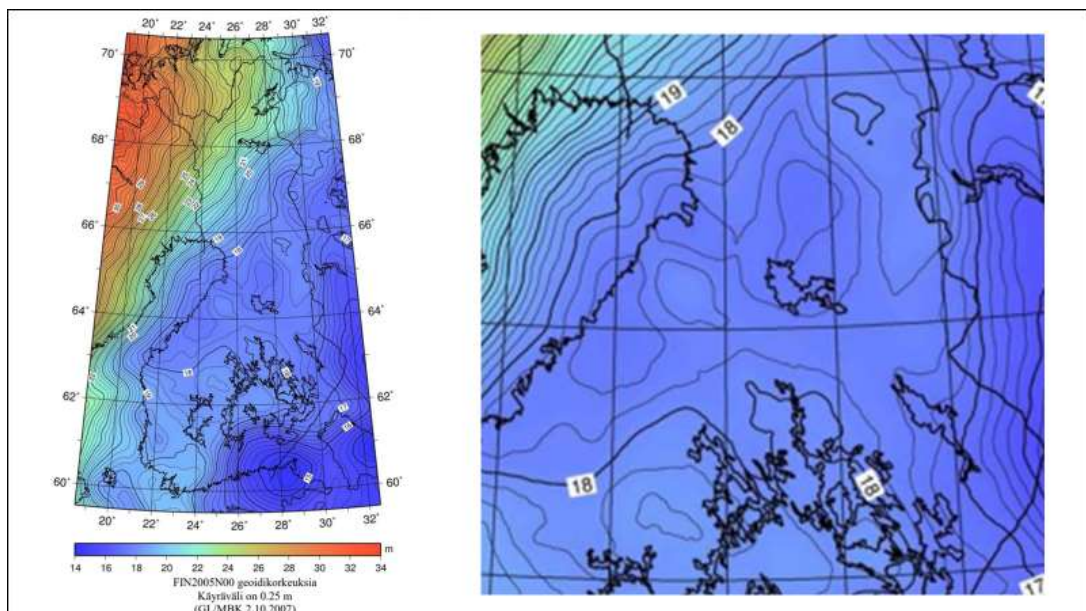
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$$

Jossa O = tunnettu arvo, eli tässä tapauksessa itsenäinen korkeustieto mittauspisteestä, P = tutkimusaineiston avulla luodun pintamallin korkeustieto ja n on otannan määrä. Kyseinen yhtälö on” ISO/DIS 19157:2012 Geographic information – data quality-standardin mukainen (Sirkiä ym. 2016).

5.5. Vertailuaineisto

Suhteellista tarkkuutta tarkastellessa vertailuaineistona tässä tutkimuksessa on Maanmittauslaitoksen tuottama kahden metrin korkeusmalli, jonka korkeustietoihin tutkimusaineiston vastaavan pisteen korkeustietoja verrataan. Tutkimuksessa käytetty kahden metrin korkeusmalli on ilmalaserkeilaukseen perustuva maanpinnan korkeutta kuvaava korkeusmalli, jonka pistetiheys on vähintään 0,5 pistettä/m². Kohteena on paljas maan pinta, johon eivät kuulu maanpinnalla olevat irtonaiset kohteet, kuten esimerkiksi isot kivet, ihmisen muodostamat ei-pysyvät pinnanmuodot sekä ihmisen luomat rakenteet, kuten talot ja sillat. Tästä poikkeuksen muodostavat aktiiviset maa-aineksen ottoalueet ja keskeneräiset suurialaiset rakennustyömaat, joilla maa-ainekasat jätetään automaattisen maanpintaluokituksen mukaiselle korkeustasolle. Korkeusjärjestelmänä vertailuaineistossa on käytetty N2000-järjestelmää (Sirkiä ym. 2016). Tässä tutkimuksessa käytetty kartta-aineisto on laatuluokkaa 1. Tämä tarkoittaa, että korkeusmallin korkeussijainnin RMSE on pienempi kuin 0,30 m. Korkeussijainnin harhan on parempi, kuin -0,10 – 0,20 metriä. Korkeusmallin on alueellisesti 100 % täydellinen. RMSE:n ja korkeussijainnin harhan laskemisessa on käytetty ISO/DIS 19157:2012 geographic information – data quality standard– data quality standardin mukaisia laatumittareita (Sirkiä ym. 2016).

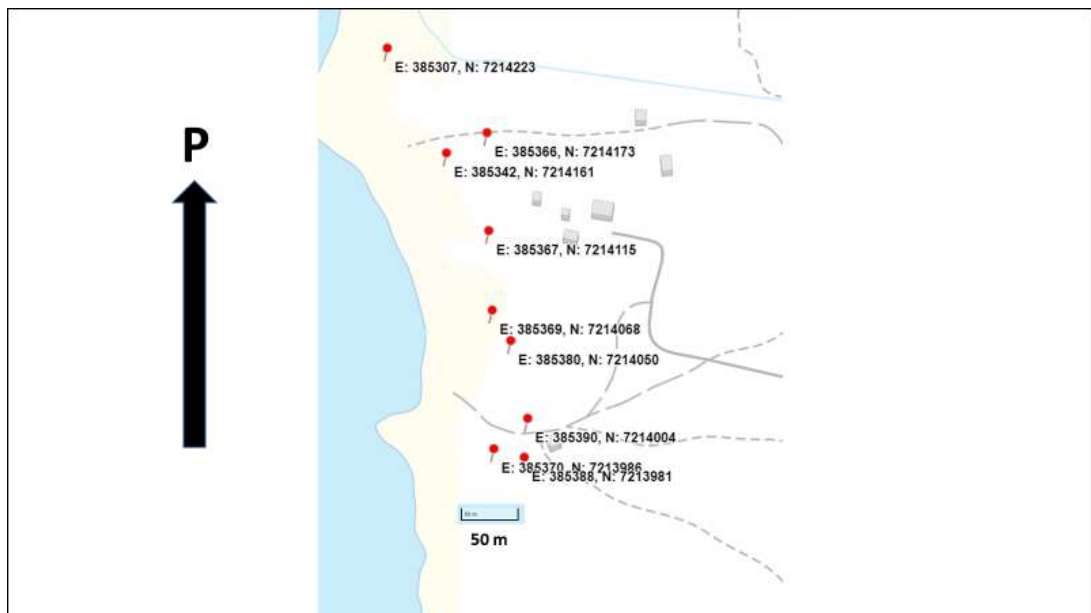
Vertailuaineiston ja tutkimusaineiston korkeustiedot ovat eri korkeusjärjestelmissä. Näin ollen korkeustiedot eivät suoraan ole vertailukelpoisia, joten tutkimusaineiston GPS-korkeudet muutettiin N2000-korkeusjärjestelmää vastaaviksi korkeuksiksi. Tämä tapahtui yhtälöllä $H = h - N$, missä H = korkeus N2000 järjestelmässä, h = GPS-korkeus ja N = Geoidin korkeus. Suomessa käytettävä geoidimalli korkeusmuunnoksia tehdessä on FIN2005N00-geoidimalli (kuva 12), jonka tarkkuus on koko Suomen alueella parempi kuin 5 cm (Birker-Koivula 2007; Birker-Koivula & Ollikainen 2009).



Kuva 12. FIN2005N00 geoidikorkeudet ilmoitettuna 0,25 metrin käyrävälillä. Hailuodon alueella geoidin korkeus on noin 17,5 metriä (Birker-Koivula 2007. © Maanmittauslaitos 10/2019).

Geoidikorkeuden määrittäminen tässä tutkimuksessa on tehty vertailuaineiston korkeustietojen avulla. Tutkimusalueelle määritellyistä mittauspisteistä valittiin sattumanvaraisesti yhteensä yhdeksän pistettä (kuva 13) joiden koordinaatti- ja korkeustiedot syötettiin Maanmittauslaitoksen ylläpitämään koordinaattimuunnospalveluun osoitteessa kartta.paikkatietoikkuna.fi. N2000-järjestelmän korkeustiedot muutettiin ellipsoidikorkeuksiksi. Ellipsoidikorkeudesta vähennettiin N2000-järjestelmän korkeus, jolloin saatiin johdetuksi kyseisen mittauspisteen geoidikorkeus. Yhdeksän mittauspisteen geoidikorkeuden keskiarvo

oli 17,6414 metriä minimin ollessa 17,6408 metriä ja maksimin 17,6427 metriä. Geoidimallin (kuva 12) tarkastelun perustella voidaan saadun geoidisen korkeuden olevan perustellusti johdettu. Tämän jälkeen saatua geoidisen korkeuden keskiarvoa käytettiin laskiessa tutkimusaineiston GPS korkeuksille N2000-järjestelmää vastaavat korkeudet. Absoluuttisen tarkkuuden osalta vertailuaineistona käytettiin neljää EMLID Reach RS+ GPS-yksiköllä mitattua GPS-pistettä sattumanvaraisista paikoista, joiden korkeustietoja verrattiin tutkimusaineiston korkeustietoihin ArcMap 10.7.1.-ohjelmistolla.



Kuva 13. Geoidikorkeuden arvioimisessa käytettyjen korkeustietojen mittauspisteiden koordinaattitiedot ilmoitettuna ETRS-TM35FIN-koordinaattijärjestelmässä. Käytetyt korkeustiedot mittauspisteittäin on saatu vertailudatan DEM:sta (© Maanmittauslaitos 10/2019).

6. TULOKSET

Ensimmäinen tutkimuskysymys koskee kuvauskorkeuden vaikutusta mallin geolokaation tarkkuuteen. Tarkkuutta arvioidaan tässä tutkimuksessa sekä malliin itseensä sisältyvällä datalla (GCP:itten arvoitu paikkatietovirhe) että vertaamalla malleja LiDAR-aineiston korkeustietoihin ja itsenäisiin tutkimusalueelta mitattuihin korkeustietoihin. Visuaalisella tarkastelulla sekä pinnanmuotojen havainnoinnin mahdollisuuksia vertaamalla tarkastellaan lentokorkeuksien tarkoituksenmukaisuutta ja visuaalista tarkkuutta.

6.1. Tarkkuusmitattujen paikkatietopisteitten (GCP) paikkavirhe

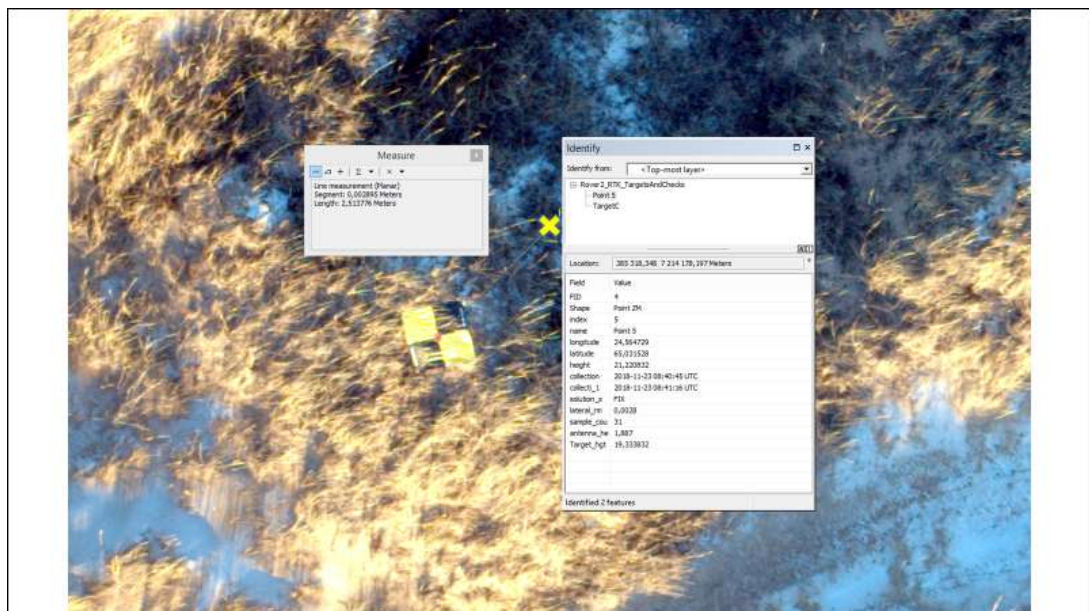
Taulukossa 1 on esitetty SfM-mallien geolokaation (GCP:itten) tarkkuudet arvoituna RMS-virheenä) x, y ja z koordinaateille sekä kokonaisvirheet molempien lentokorkeuksien osalta. Resoluutio on SfM-prosessissa muodostetun digitaalisen korkeusmallin resoluutio, ei otettujen valokuvien resoluutio. 53,7 metrin lentokorkeuden aineisto on prosessoitu kahdesti. Ensimmäisen prosessoinnin tulokset ovat merkitty a-kirjaimella korkeuden perään ja toisen prosessoinnin tulokset b-kirjaimella.

Lentokorkeuden ollessa 59 metriä datasta prosessoidun DEM:n tarkkuus on 2,95 cm/pikseli. Lentokorkeuden ollessa 53,7 metriä (a) tarkkuudeksi saadaan 2,81 cm/pikseli sekä (b) samoin 2,81 cm/pikseli. Korkeamman lentokorkeuden osalta GCP:itten geolokaation yhtenäisvirhe on 4,29 cm ja matalamman lentokorkeuden (a) osalta 2,03 cm ja (b) 5,17 cm. Tulokset molempien lentokorkeuksien ja kaikkien GCP:ien osalta on taulukossa 1.

Taulukko 1. Kahden eri lentokorkeuden osalta lasketut keskineliövirheen neliöjuuret x koordinaatille, y koordinaatille sekä z koordinaatille senttimetreissä ilmoitettuna (RMSE) malleihin kuuluvien tarkkuusmitattujen paikkatietopisteitten (GCP) osalta. 59 metrin lentokorkeuden osalta paikkatietopisteitä oli käytössä kahdeksan kappaletta ja 53,7 (a) metrin lentokorkeuden mittauksessa neljä kappaletta sekä (b) viisi kappaletta. Resoluutio on lentodatasta lasketun digitaalisen korkeusmallin (DEM) pikselitarkkuus. Lisäksi taulukossa on esitetty jokaisen GCP:n arvoitu paikkatietovirhe erikseen molempien lentokorkeuksien osalta.

| KORKEUS (m) | RESOLUUTIO (cm/pix) | RMSE X (cm) | RMSE Y (cm) | RMSE Z (cm) | RMSE YHT. (cm) |
|-------------------|---------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|----------------|
| 59 m | 2,95 | 1,309 | 1,047 | 3,956 | 4,29 |
| 53,7 m (a) | 2,81 | 1,75 | 0,804 | 0,656 | 2,03 |
| 53,7 m (b) | 2,81 | 0,55 | 0,275 | 5,136 | 5,17 |
| 59 m | RMSE X (cm) | RMSE Y (cm) | RMSE Z (cm) | RMSE YHT. (cm) | |
| Target 1 | 1,15 | -1,92 | -6,09 | 6,49 | |
| Target 2 | 1,63 | 1,74 | 2,83 | 3,7 | |
| Target 3 | -1,58 | -0,89 | -0,54 | 1,89 | |
| Target A | 1,32 | 0,4 | 4,61 | 4,81 | |
| Target B | 0,59 | -0,28 | -4,9 | 4,94 | |
| Target C | -0,04 | -0,19 | -3,01 | 3,02 | |
| Target D | -1,15 | 0,96 | 3,57 | 3,87 | |
| Target E | -1,93 | 0,17 | 3,54 | 4,04 | |
| 53,7 m (a) | RMSE X (cm) | RMSE Y (cm) | RMSE Z (cm) | RMSE YHT. (cm) | |
| Target A | 1,02 | 1,03 | 0,32 | 1,49 | |
| Target C | -1,46 | -0,91 | -0,31 | 1,75 | |
| Target D | -1,9 | -0,63 | -0,87 | 2,18 | |
| Target E | 2,33 | 0,53 | 0,86 | 2,54 | |
| 53,7 m (b) | RMSE X (cm) | RMSE Y (cm) | RMSE Z (cm) | RMSE YHT. (cm) | |
| Target A | 0,42 | 0,16 | -1,99 | 2,04 | |
| Target b | -0,23 | 0,41 | 7,98 | 8,00 | |
| Target C | -0,34 | -0,26 | -7,83 | 7,85 | |
| Target D | 0,84 | -0,33 | 0,28 | 0,95 | |
| Target E | -0,69 | -0,01 | 1,61 | 1,76 | |

Tuloksia tarkastellessa tulee huomata, että RMSE ei tässä yhteydessä ilmoita pintamallien sijainnin absoluuttista virhettä suhteessa koordinaatistoon, vaan kaksiulotteisen pinnan kolmiulotteiseksi muuttamisesta aiheutuvan arvion GCP:itten paikkavirheestä, kuten edellä tässä tutkimuksessa on mainittu. Kuitenkin saatuja pintamalleja koordinaatistoon ja toisiinsa vertaamalla huomattiin, että 53,7 metrin korkeudelta kuvatusta aineistosta muodostettu mallissa oli säännöllinen 2,5 metrin poikkeama. Tilanne on havainnollistettu kuvassa 14.

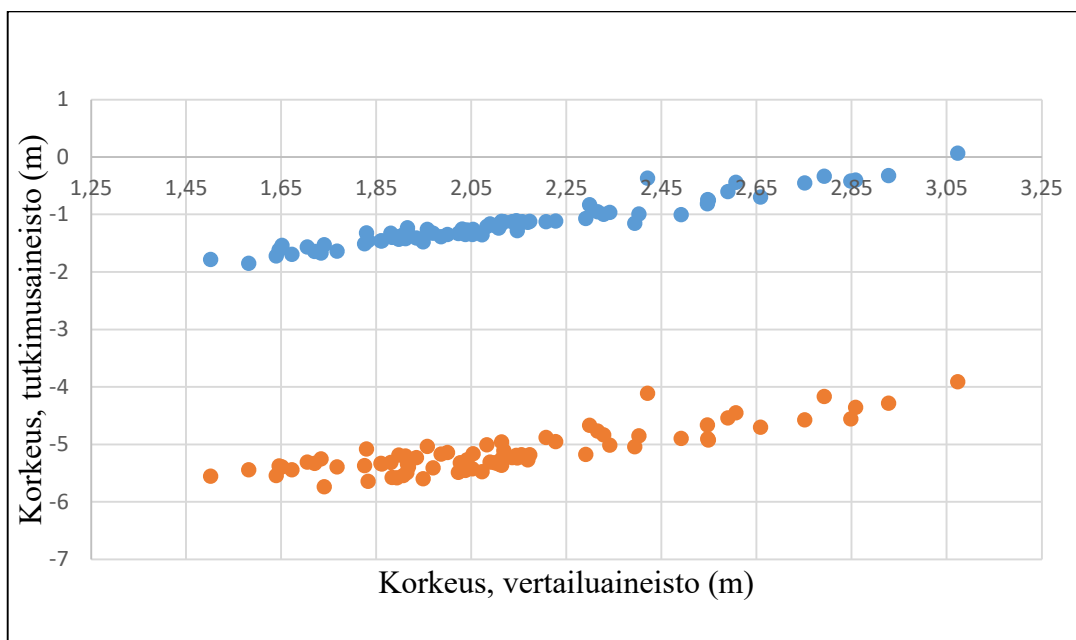


Kuva 14. 53,7 metrin korkeudelta kerätyn aineiston avulla tehdyn pintamallin systemaattinen paikkatietovirhe oli 2,5 metriä. Oikea GCP:n (tarkkuusmitattu paikkatietopiste) paikka on merkitty keltaisella ristillä.

Poikkeama ei vaikuta GCP:itten RMS-virheeseen tai mallin pikselitarkkuuteen. Kuitenkin sen käyttö suhteellisen tai absoluuttisen tarkkuuden arvioinnissa muuten ei onnistu, koska ne vaativat reaailmaailman koordinaatistoon sidotut mallit. Tämän johdosta 53,7 metrin mallin data prosessoitiin toisen kerran, ja tätä reaailmaailman koordinaatistoon sijoittuvaa mallia (53,7m(b)) on käytetty sekä suhteellisen että absoluuttisen tarkkuuden arvioinnissa.

6.2. Suhteellinen tarkkuus vertailudatan korkeustietojen suhteen

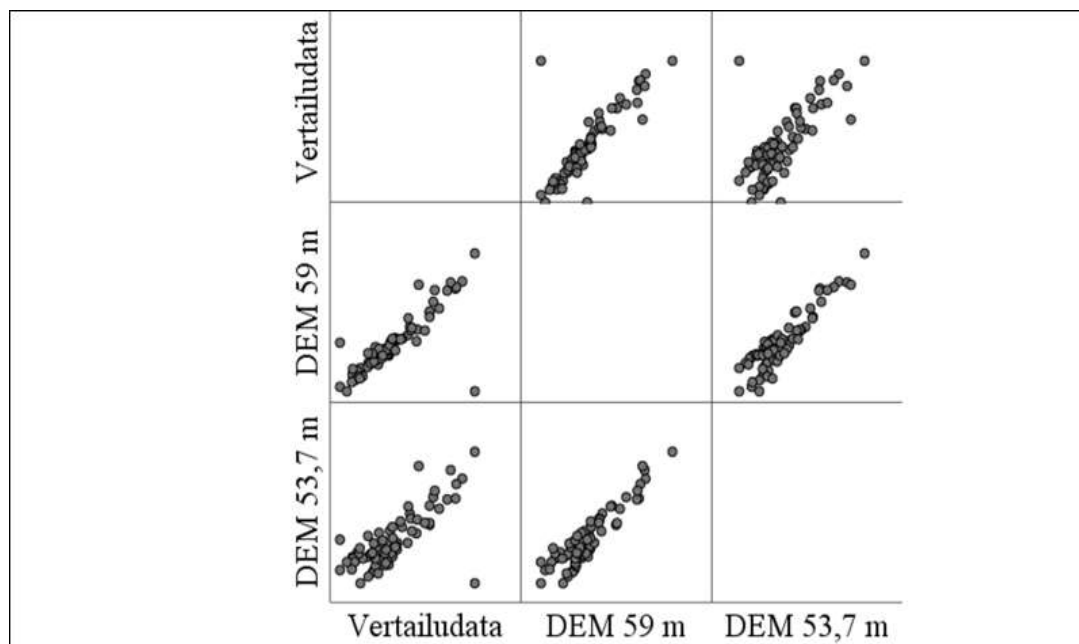
Kuvassa 15 on tarkasteltu tutkimusaineiston DEM-mallien korkeustietojen riippuvuutta vertailuaineiston korkeustietojen kanssa niin, että tarkastelussa on mukana myös absoluuttiset korkeustiedot. Kuvasta nähdään, että molempien lentokorkeuksien DEM-mallit näyttävät systemaattisesti matalampia arvoja kuin vertailuaineisto. Mielenkiintoinen havainto on, että matalamman lentokorkeuden aikana kerätyn datan DEM-malli näyttää huomattavan poikkeavia arvoja suhteessa vertailuaineistoon, mutta myös korkeamman lentokorkeuden DEM-malliin. Kuitenkin molemmat pintamallit käyttäytyvät systemaattisesti niin, että vertailuaineiston paikkatiedon korkeuden kasvaessa kasvaa myös SfM-DEM-mallien korkeudet. Riippuvuus näyttäisi olevan molempien mallien kohdalla lineaarista. Lisäksi hajonta näyttää olevan pientä etenkin korkeamman lentokorkeuden DEM-mallin kohdalla. Matalamman lentokorkeuden osalta suhteellinen ennustettavuus näyttäisi paranevan etenkin silloin, kun vertailuaineiston korkeus ylittää 2,05–2,25 metrin arvon. Alle 2,05 metrin kohdalla hajonta näyttäisi olevan suurempaa ja ennustettavuus heikompaa matalamman lentokorkeuden DEM:lla kuin 59 metrin lentokorkeuden DEM:lla.



Kuva 15. Kuvassa on esitetty 59 metrin lentokorkeuden (ylempi pistekuvio) ja 53,7 metrin lentokorkeuden (alempi kuvio) aineistojen avulla laadittujen digitaalisten korkeusmallien yhteys Maanmittauslaitoksen 2 metrin korkeusmallin. X-akselilla on Maanmittauslaitoksen vertailuaineiston korkeus ja Y-akselilla tutkimusaineiston korkeus. Molempien akselien korkeustiedot ovat n2000-järjestelmässä.

6.3. Pintamallien välinen korrelaatio

Mallien korkeustietojen korrelaation tarkastelussa käytettiin Spearmanin järjestyskorrelaatiokerrointa. Hajontakuvion (kuva 16) perusteella näyttää siltä, että kaikkien kolmen mallin suhde on positiivinen ja lineaarinen. Kuvioista nähdään myös, että joukossa on yksi havaintopiste, joka poikkeaa selvästi muista havainnoista.



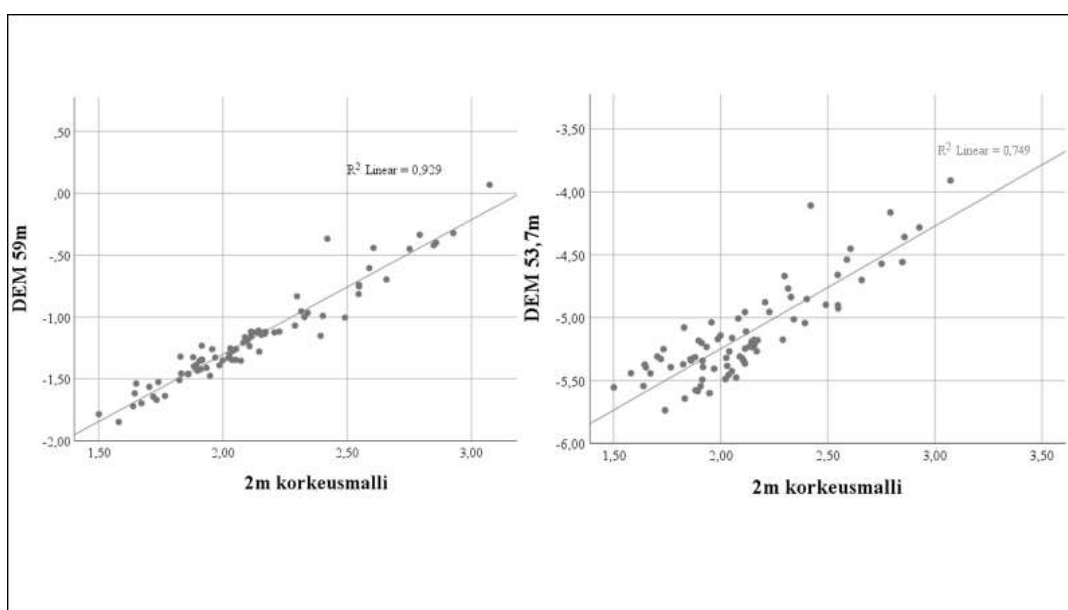
Kuva 16. Hajontakuviot vertailudatan, eli Maanmittauslaitoksen 2m resoluution korkeusmallin sekä tutkimusaineiston kahden eri lentokorkeuden datasta laaditun digitaalisen korkeusmallin korkeustietojen yhteydestä.

Pintamallien korkeustietojen korrelaatiot on esitetty taulukossa 2. Pintamallien väliset korrelaatiot ovat erittäin korkeita. DEM 59:n ja vertailudatan korrelaatio on 0,961 sekä DEM 53,7:n ja vertailudatan vastaavasti 0,807. Kaikki tulokset ovat tilastollisesti merkitseviä. Lisäksi tuotettujen pintamallien välinen korrelaatio on erittäin korkea, 0,829.

Taulukko 2. Pintamalleista johdettujen digitaalisten korkeusmallien (DEM) väliset Spearmanin järjestyskorrelaatiokertoimet sekä tulosten tilastolliset merkitsevyydet.

| | | Vertailudata | DEM 59m | DEM 53,7m |
|--------------|--------------------|--------------|---------|-----------|
| Vertailudata | Korrelaatiokerroin | 1,000 | 0,961** | 0,807** |
| | Merkitsevyys | | p<0,001 | p<0,001 |
| | N | 77 | 77 | 77 |
| DEM 59m | Korrelaatiokerroin | 0,961** | 1,000 | 0,829** |
| | Merkitsevyys | p<0,001 | | p<0,001 |
| | N | 77 | 77 | 77 |
| DEM 53,7m | Korrelaatiokerroin | 0,807** | 0,829** | 1,000 |
| | Merkitsevyys | p<0,001 | p<0,001 | |
| | N | 77 | 77 | 77 |

SfM-DEM-mallien ja vertailudatan välinen selitysaste on DEM 59 m osalta 0,929 ja DEM 53,7 m osalta 0,749 (kuva 17). Tämä tarkoittaa sitä, että DEM 59 m osalta noin 93 % ja DEM 53,7 m osalta noin 75 % vaihtelusta johtuu sen riippuvuudesta tässä tapauksessa vertailudatan muuttujaan. Korkeushavainnot eivät sovi 1:1-linjalle vertailuaineiston korkeustietojen kanssa, mutta mielenkiinnon kohteena onkin korkeustietojen yhteisvaihtelu.



Kuva 17. Digitaalisten korkeusmallien DEM 59 m ja DEM 53,7 m selitysasteet suhteessa vertailudataan (2m korkeusmalli).

6.4. Absoluuttinen tarkkuus

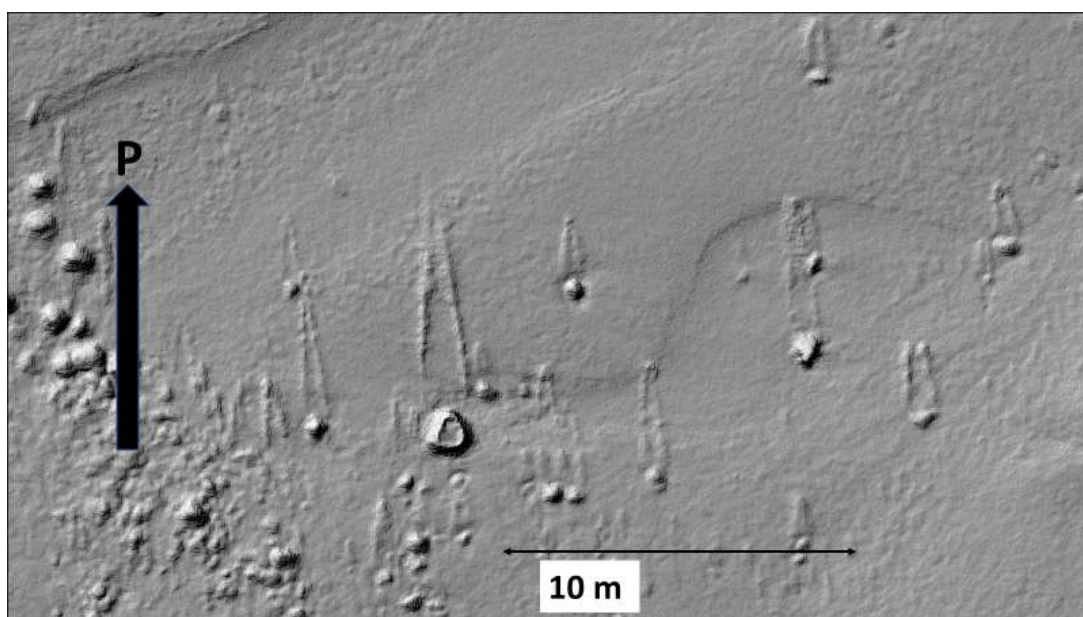
Molempien SfM-tekniikalla tehtyjen pintamallien (59m ja 53,7m) absoluuttista tarkkuutta arvoitiin laskemalla RMSE itsenäisten, malleihin kuulumattomien GPS-korkeustietojen avulla. 59m mallin osalta RMSE oli 0,69 metriä ja 53,7m mallin osalta 3,59 metriä. Itsenäisiä korkeustietoja tarkastellessa havaittiin kuitenkin yhden mittauspisteen osalta yli kaksinkertainen erotuksen suuruus korkeustiedoissa verrattuna muiden mittauspisteitten korkeustietojen erotukseen 59m mallin osalta. Lähempi tarkastelu osoitti, että korkeustietoa tutkimusalueella mitatessa GPS-mittarin korkeus on ilmoitettu olevan 1,887 metriä jokaisella muulla mittauspisteellä paitsi selvästi suurempaa poikkeamaa osoittavalla mittauspisteellä, jolla mittarin korkeus oli merkitty olevan 2,287 metriä. Jättämällä kyseinen mittauspiste pois aineistosta, RMSE 59m-mallin osalta on 0,31 metriä ja 53,7m-mallin osalta 3,74 metriä.

59m-mallin osalta korkeustiedot poikkesivat vertailudatan vastaavien pisteiden korkeustiedoista -0,31, -0,35, -0,42 ja (-1,22) metriä. Suluissa poikkeavan eron mittauspisteen poikkeamatieto. 53,7m-mallin osalta vastaavien mittauspisteiden erot olivat -3,5, -3,76, -3,92 ja (-3,1) metriä. Tuloksista huomataan, että vaikka 53,7m-malli on absoluuttisesti selvästi epätarkempi, poikkeama erojen keksiärvosta on maksimissaan 0,19 cm, kun taas 59m-mallin osalta sama tulos on 0,6 cm. Vaikka maksimipoikkeamat ovatkin pienet molemmissa, on tulos huomionarvoinen, kun tarkastellaan matalamman lentokorkeuden suurta maksimivirhettä.

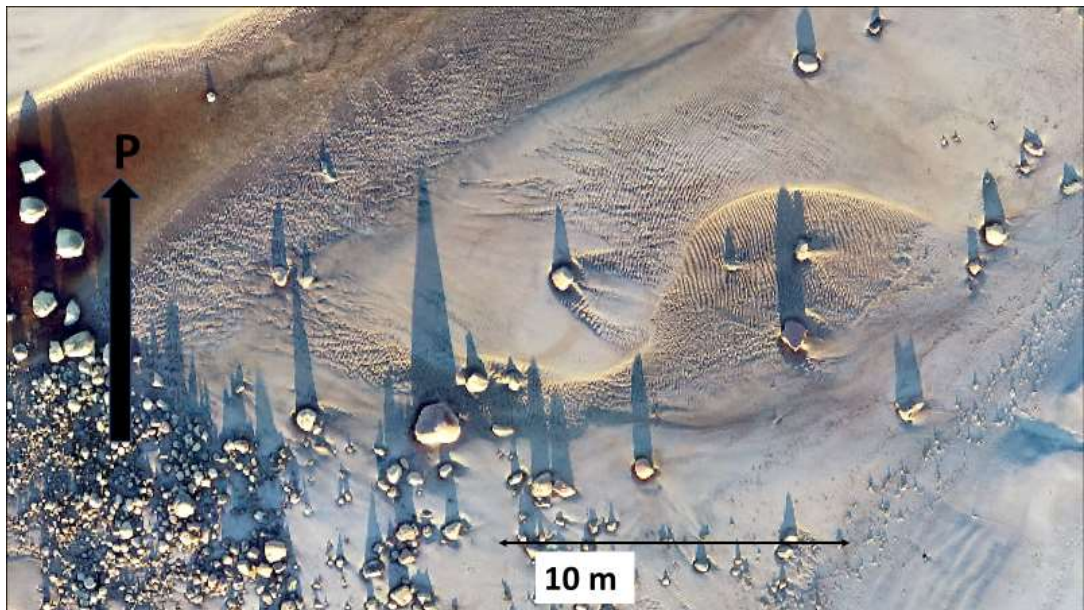
6.5. Pintamallien visuaalinen tarkastelu ja pinnanmuotojen havaitseminen

Visuaalisessa tarkastelussa verrattiin kahden lentokorkeuden SfM-pintamalleja toisiinsa niin, että molempien osalta tarkastelun kohteena olivat rannan geomorfologiset muodot ja niiden tunnistaminen. 59m-mallin ja 53,7m-mallin välillä havaittiin eroja niiden kyvyssä havaita senttimetriluokan rakenteita, kuten aallonmerkkejä niin, että 53,7m-malli osoittautui tarkemmaksi. SfM-prosessi tuotti DEM:ien tarkkuuksiksi 59m-mallin osalta 2,95 cm/pix ja molempien 53,7-mallien tarkkuudeksi 2,81 cm/pix. Visuaalinen tarkastelu tehtiin ArcMap 10.7.1-ohjelmistolla.

Rinnevarjostusformaatteja visuaalisesti tutkiessa 59m-mallissa havaittiin symmetrisiä nuolenpäitä muistuttavia muotoja rannan kivien pohjoispuolella, jotka vaikuttivat olevan koholla suhteessa välittömään lähiympäristöön (kuva 19). Tarkastellessa saman mallin ortomosaiikkia huomattiin, että kyseiset muodot noudattivat kivistä lankeavien varjojen rajoja (kuva 20). Samaa ilmiötä ei havaittu 53,7m-mallin osalta.

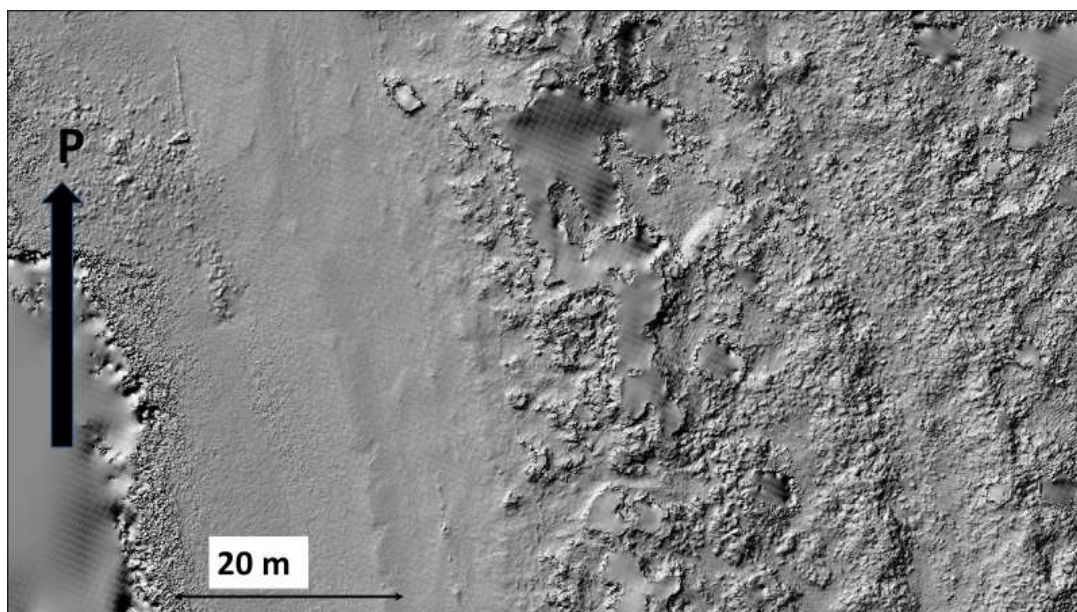


Kuva 19. 59m-mallin rinnevarjostusformaateissa havaitut nuolenpäämuodot kivien pohjoispuolella erottuvat selvästi ja vaikuttavat olevan koholla ympäristöönsä nähden.

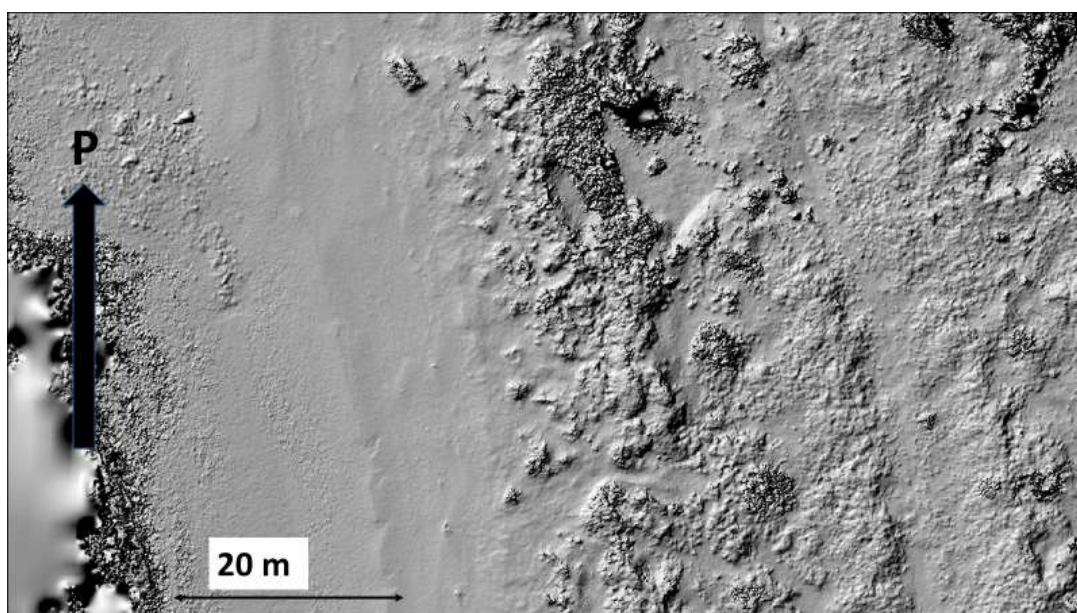


Kuva 20. 59m-mallin ortomosaiikista nähdään, että rinnevarjostusformaatin kivien pohjoispuoliset nuolenpääkuviot noudattavat symmetrisesti varjojen rajoja.

Toinen merkilläpantava eroavaisuus rinnevarjostusmallien tulkintakyvyssä oli 59m-mallin runsaat mallintamatta jääneet kohdat verrattuna 53,7m-malliin (kuvat 21 ja 22). Otromosaiikkeja tarkastellessa nämä alueet ovat kasvillisuusalueita. Havainto on mielenkiintoinen, koska toisaalta 59m-mallilla on ikään kuin taipumusta ylitulkita varjot pinnanmuodoiksi mutta jättää kasvillisuuspeitteen kohdat kokonaan mallintamatta.

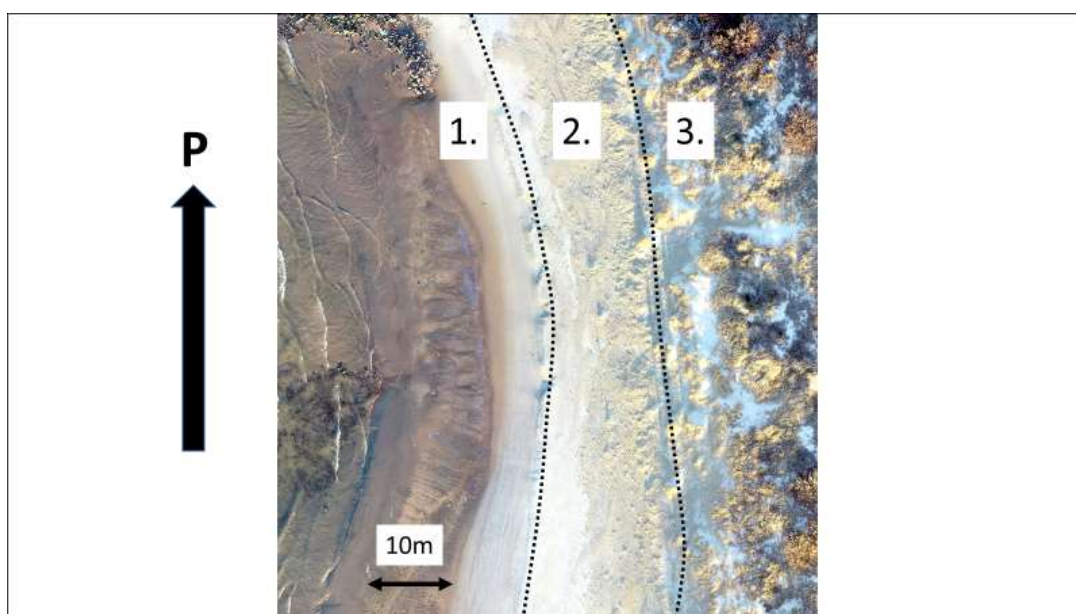


Kuva 21. 59m-mallin rinnevarjostuskuva, jossa rannan dyynialueen kasvillisuus ei ole mallinnettuna, vaan näkyy tasaisena leikattuna pintana kuvan keskellä. Kuvan vasemmassa ylänurkassa nähdään edelleen kivi, jonka pohjoispuolelle on mallinnettu pinnanmuoto, joka oikeasti on vain varjo maanpinnalla.



Kuva 22. 53,7m-mallin rinnevarjostuskuva, jossa edellisestä kuvasta poiketen dyynialueen kasvillisuus pienitekstuurisena rakenteena.

Sekä 59m-mallin että 53,7m-mallin avulla voidaan rannan profiilista erottaa takarannan mantereen puolelta päättävä dyynialue, takaranta, taka- ja eturannan erottava valli sekä eturanta (kuva 23). Tarkempien yksityiskohtien havainnointi ei onnistu 59m-mallin avulla, mutta onnistuu 53,7m-mallin pohjalta. Esimerkiksi takarannan alueella olevat aallonmerkit näkyvät selvästi 53,7m-mallin avulla, mutta ne eivät erotu 59m-mallissa (kuvat 24 ja 25). Molempien mallien osalta takarannan selvästi eturantaa jäsentymättömämpi rakenne saadaan esille ja takarannan alueella voidaan havaita tuulen kuljettamaa tai veden kerrostamia hiekka-alueita ja paikoittaisia aallonmerkkikuvioita.

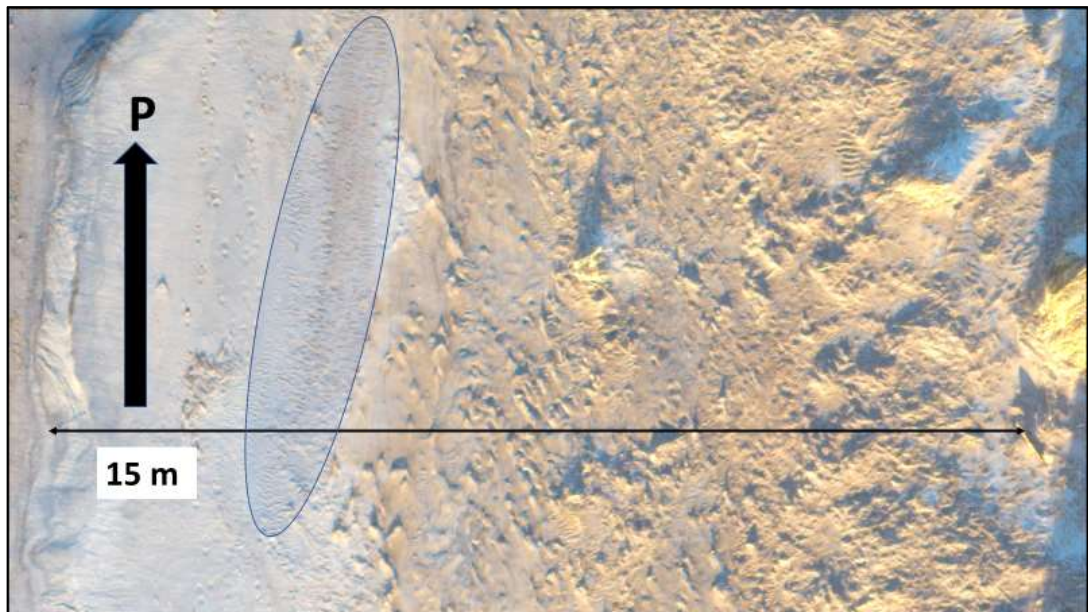


Kuva 23. 59m-mallin ortomosaiikkikuva rannan profiilista. 1 = eturanta, katkoviivan kohdalla etu- ja takarannan erottava valli, 2 = takaranta, 3 = dyynialue.

Eturannan osalta molemmat mallit näyttävät säännöllisen, sileän pinnan, josta ei ole erotettavissa erikseen mitään rakenteita tai pinnanmuotoja. Tämä perustella voidaan olettaa, että alue on säännöllisesti veden peittämänä ja vesi tasoittaa alueen profiilin sileäksi. Lisäksi etu- ja takarannan erottava törmä sekä siinä olevat veden virtausuomat (kts. kuvan 23 keskialue) erottuvat selvästi molemmissa pintamalleissa.



Kuva 24. 59m-mallin ortomosaiikki ei tuo esiin kuvan 25 ellipsin alueella olevia rannan suuntaan nähden poikittaisia aallonmerkkejä, vrt. kuva 25.

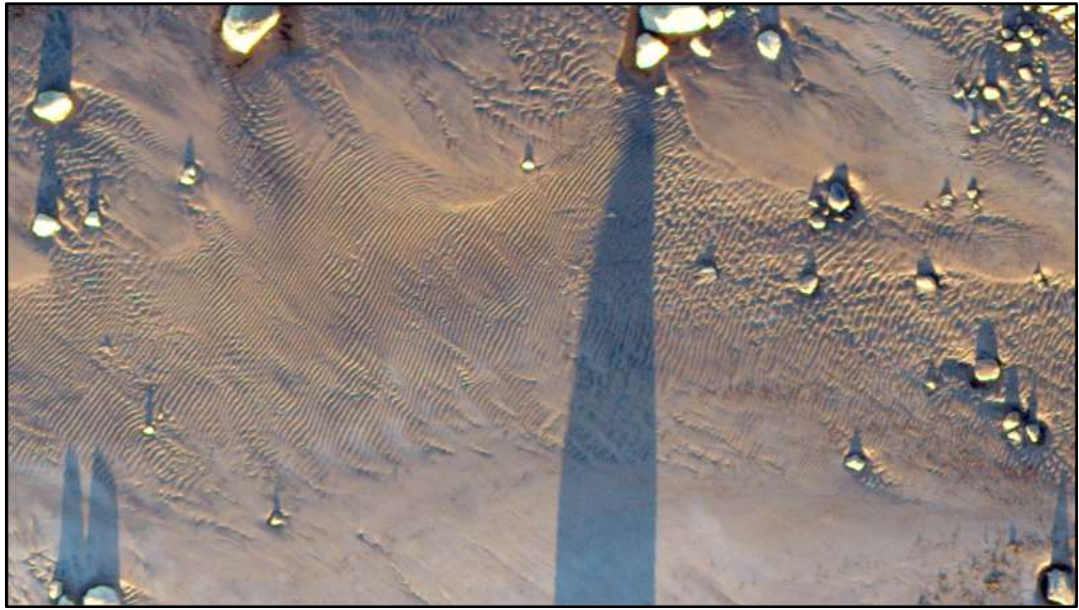


Kuva 25. 57,3m-mallin ortomosaiikista voidaan takarannan alueelta erottaa rannan suuntaan nähden poikittaisia aallonmerkkejä (ellipsin kohdalla).

Erotuskykyjen ero tulee esille pienten yksityiskohtien havainnoinnissa. Esimerkiksi tarkastellessa aallonmerkkikuvioita 59m-mallin tekstuurista ei paikoitellen saa selvää, mutta 53,7m-mallin osalta erotuskyky on vielä hyvä (kuvat 26 ja 27). 53,7m-mallissa kuvaa voi tarkentaa erittäin lähelle erotuskyvyn edelleen parantuessa, mutta 59m-mallissa tämä ei enää paranna kuvan erotuskykyä vaan huonontaa sitä. Aallonmerkkien suuntaa ei voi johdonmukaisesti seurata 59m-mallissa. Lisäksi yksittäisiä aallonmerkkejä on vaikea erotella toisistaan. 53,7m-mallissa yksittäiset aallonmerkit erottuvat toisistaan ja niiden suunta voidaan päätellä tarkasti.



Kuva 26. 59m-mallin ortomosaiikkia tarkastellessa huomataan aallonmerkkikuvioiden osalta rakeisuutta. Tämä johtaa tilanteeseen, jossa aallonmerkkien suuntaa on paikoitellen haasteellista hahmottaa luotettavasti sekä yksittäisiä aallonmerkkejä erottaa toisistaan.



Kuva 27. 53,7m-mallin ortomosaiikkia tarkastellessa aallonmerkkikuviot erottuvat selvästi toisistaan, ja niiden suunta voidaan päätellä olevan rannansuuntainen.

Eturannan alueen aallonmerkit ovat rannan suuntaiset, mutta takarannan osalta aallonmerkit ovat vasten rannan suuntaa. Tästä voi päätellä, että takarannan alueen aallonmerkit ovat syntyneet joko tuulen käydessä rannan suuntaisesti tai alueen ollessa veden alla, esimerkiksi myrskyn aikana tuuli ja aallon ovat olleet pohjoiseteläsuuntaiset.

7. POHDINTA

7.1. GCP:itten arvioitu paikkatietovirhe

59m-mallin GCP:itten RMSE on tässä tutkimuksessa 4,29 cm. RMSE 53,7(a):n osalta on 2,03 sekä 53,7(b):n 5,17 cm (taulukko 1). Vaikka 53,7m(a)-mallin lentokorkeus on ollut vain 5,5 metriä matalampi kuin 59m-mallin lentokorkeus, on RMSE 2,1 kertaa pienempi verrattuna 59m-mallin RMS-virheeseen GCP:itten osalta. Toisaalta 53,7m(a):n kohdalla havaittiin 2,5 metrin paikannusvirhe reaaliaikaisen koordinaatistoon sitomisen yhteydessä. Tällä ei kuitenkaan ole merkitystä itse mallin suhteellisen tarkkuuden arvioinnissa GCP:itten RMSE:n kohdalla, joten tulos on näin ollen vertailukelpoinen tässä kyseisessä kontekstissa. Jokaisen kolmen mallin RMSE on edelleen pieni, jos sitä vertaa esimerkiksi kenttätöissä GCP: itten paikkojen mittauksessa käytettyjen instrumenttien tarkkuuteen (3,64 cm). Esimerkiksi 53,7(a):n kokonais-RMSE on GCP:itten osalta 2,03 cm, joka on pienempi kuin mittalaitteiden virhe. Mielenkiintoisen tuloksista tekee 53,7(b):n RMSE, joka on 5,17 cm. Virhe ei ole itsessään suuri, jos sitä vertaa esimerkiksi Kršákin ym. (2016) GCP: itten vastaavaan virheeseen, joka on 4,79 cm 35 metrin lentokorkeudella tai Lucieerin ym. (2014) tulokseen joka 3,6 cm ja 7,8 cm lentokorkeuden ollessa 40 metriä.

Kuitenkin 53,7(a):n tarkkuus on 2,55 kertaa parempi verrattuna 53,7(b) tulokseen, vaikka lentokorkeus on ollut sama. Suuri ero, tai virhe b:n osalta suhteessa a:n tulokseen voitaneen selittää kahdella z-koordinaatin RMSE-tuloksella: (Target b ja Target c) 7,98 cm ja -7,83 cm. Samoja GCP:itten virheitä ei esiinny malli a:ssa. Koska tulokset on prosessoitu samoista valokuvista, mutta tulokset näiltä osin poikkeavat mallien välillä, ei inhimillisen virheen mahdollisuutta voida poissulkea. Toisaalta malli a:n GCP:itten paikannusvirhe x- ja y-koordinaattien kohdalla on systemaattisesti suurempi kuin malli b:ssä, mutta malli b:n GCP:itten virheet ovat kaikki suuremmat z-koordinaattien osalta, joten sitä, onko prosessoinnissa tapahtunut mahdollinen virhe kertaluontoinen tai systemaattinen, on vaarallista lähteä arvaamaan, tai onko prosessissa tapahtunut varsinaista virhettä ollenkaan.

Toisaalta Lucieerin ym. (2014) kahden eri SfM-tuotteen GCP:itten RMSE oli 3,6 cm ja 7,8 cm lentokorkeuden ollessa molempien tuotteiden osalta 40 metriä. Tulos osoittaa, että samoilla kenttätöiden järjestelyilläkin lopullisten mallien tarkkuus saattaa vaihdella, joten tässä tutkimuksessa havaittu ero kahden saman lentokorkeuden RMS-virheen erosta ei ole poikkeuksellinen ja se näyttäisi olevan linjassa Lucieerin ym. (2014) havaintojen kanssa.

Kršák ym. (2016) käyttivät omassa mallissaan kymmentä GCP:tä ja Lucieer ym. (2014) käyttivät 24 kappaletta GCP:tä. Tässä tutkimuksessa käytettiin korkeammalla lennettäessä kahdeksaa ja matalammalla lennettäessä a:n osalta neljää sekä b:n osalta viittä GCP:tä. Tämän tutkimuksen kohdalla RMSE oli kahdeksalla GCP:llä 4,29 cm, joten tulos on lähellä Kršák ym. (2016) tulosta ja Lucieerin ym. (2014) tulosten välissä, vaikka kuvaus onkin tapahtunut 59 metrin korkeudelta eli korkeammalta kuin edellä mainituissa tutkimuksissa on kuvattu. Tämän tutkimuksen tulosten perusteella Diterichin (2014) ja Clapuytin ym. (2015) havainnot paikannuksen tarkkuuden kasvusta lisättäessä GCP:itä eivät näyttäisi olevan johdonmukaisia, koska neljällä GCP:llä päästiin pienempään RMSE-lukemaan GCP:itten paikannusvirheen osalta kuin kahdeksalla tai viidellä GCP:llä. Tulosten näin suoraa tulkintaa kannattaa kuitenkin varoa, sillä tässä tutkimuksessa lentokorkeudet eri mallien osalta poikkesivat toisistaan ja tarkasteltava pinta-ala oli korkeammalta kuvatessa suurempi kuin matalalta kuvatessa. Vertailussa muuhun tutkimukseen pitää ottaa huomioon myös poikkeavuudet tutkimusasetelmissa. Lisäksi GCP:t olivat tässä tutkimuksessa keskittyneet korkeammalta kuvatessa tutkimusalueen keskelle ja eteläosaan sekä matalammalla lentokorkeudella kuvattavan alueen pohjois- ja eteläosiin. Näin ollen Dietrichin (2014) kommentit GCP-peiton merkityksestä näyttäisivät pitävän tässä yhteydessä paikkansa, koska matalammalta kuvattaessa pohjois- ja eteläosiin keskittyneet GCP:t muodostavat ikään kuin peiton kuvattavan alueen päälle. Luotettavampia tuloksia GCP:itten määrän ja sijoittelun osalta saataisiin koeasetelmassa, jossa lentokorkeudet ja kuvattava pinta ovat samat ja vain GCP:itten määrä sekä sijoittelu poikkeavat toisistaan.

Joka tapauksessa erot samasta aineistosta tuotetuissa malleissa GCP:itten RMSE:ssä alleviivaavat Dietrichin (2014) ja Mölk & Bolchin (2017) kommentteja siitä, että SfM-mallien laadunvarmistus on aina tutkijan vastuulla, ja että kerätyn aineiston pitkälle automatisoidun prosessoinnin aikana tutkijan suorittamat interventiot prosessiasetusten osalta vaikuttavat lopputulokseen (James ym. 2017). Kuitenkin lentokorkeus näyttäisi vaikuttavan tämän tutkimuksen perusteella GCP:itten georeferoation tarkkuuteen, koska 53,7m(a):n RMS-virhe on 2,1 kertaa pienempi verrattuna 59m-mallin RMS-virheeseen.

7.2. Pintamallien suhteellinen tarkkuus sekä pintamallien välinen korrelaatio

Pintamallien suhteellista tarkkuutta tarkastellessa huomattiin, että molemmat SfM-mallit noudattivat samaa logiikkaa suhteessa toisiinsa sekä vertailuaineistoon. Suhteellisen tarkkuuden osalta 59m-malli näyttäisi olevan 53,7m-mallia tarkempi. 59m-malli on lähempänä vertailuaineiston korkeustietoja absoluuttisesti, mutta myös korkeustietojen ennustettavuus on 59m-mallissa 53,7m-mallia parempi korrelaatiokertoimen ollessa 0,961 matalamman lentokorkeuden mallin korrelaatiokertoimeen ollessa 0,807. Molemmat korrelaatiot ovat kuitenkin erittäin korkeita. Selitysasteet samassa järjestyksessä ovat 93 % sekä 75 %. Kuvan 16 hajontakuvioista lisäksi nähdään, että DEM 59:n ja vertailudatan välillä aineistossa on kolme havaintoa, jotka erottuvat muiden havaintojen linjasta. Jos nämä havainnot otettaisiin analyysistä pois, olisi korrelaatiokerroin edelleen korkeampi. SfM-DEM:ien keskinäinen korrelaatiokerroin (0,829) on erittäin korkea ja kertoo siitä, että mallit myötäilevät toistensa arvoja, ja näin ollen suhteellisen tarkkuuden osalta mallit eivät poikkea merkittävästi toisistaan. Tämä voitaneen katsoa parantavan laadittujen SfM-mallien luotettavuutta sen suhteen, miten hyvin ne onnistuvat kuvailemaan mallinnettua pintaa. Samansuuntaisia havaintoja saivat mm. Koci ym. (2017) omassa tutkimuksessaan, jossa huomattiin systemaattinen, suhteellisen suuri negatiivinen poikkeama ($> -1\text{m}$) LiDAR-vertailuaineiston ja SfM-mallin välillä, vaikka tutkimusaineiston SfM-malli myötäilikin todellisia pinnanmuotoja, kuten on asian laita tässä tutkimuksessakin. Suhteellisen suuria poikkeamia LiDAR-aineiston ja SfM-aineiston huomattiin myös Fonstadin ym. (2013) tutkimuksessa keskimääräisen virheen ollessa 60 cm mallien välillä.

Absoluuttinen vertaaminen Maanmittauslaitoksen 2 metrin korkeusmalliin ei ole mielekäästä, koska tutkimusaineiston korkeustiedot ovat johdettu vastaamaan vertailuaineiston N2000-korkeusjärjestelmää. Jotta muunnokset ovat mahdollisia, jouduttiin alueen geoidikorkeus arvioimaan ja laskemaan vertailudatan korkeustietojen perusteella eikä sitä ollut suoraan käytössä mistään lähteestä. LiDAR-vertailuaineiston ja tutkimusaineiston korkeusarvojen yhdenmukaistamista korkeusmallista toiseen ovat tehneet mm. Koci ym. (2017). Korkeusmuutokset ovat mahdollisimman tarkkoja arvioita sekä likiarvoja. Tämän tutkimuksen korkeustietojen muunnoksen luotettavuutta parantaa kuitenkin havainto, että muunnoksessa tarvittava johdettu geoidikorkeus näyttäisi olevan yhtenevä Maanmittauslaitoksen geoidimallin (kuva 12) korkeustietojen kanssa. Lisäksi mielenkiinnon kohteena ei ole absoluuttinen tarkkuus suhteessa vertailuaineistoon vaan se, miten hyvin vertailuaineiston korkeustietojen perusteella voidaan ennustaa kahden eri lentokorkeuden pintamallien virheeseen.

7.3. Absoluuttinen tarkkuus

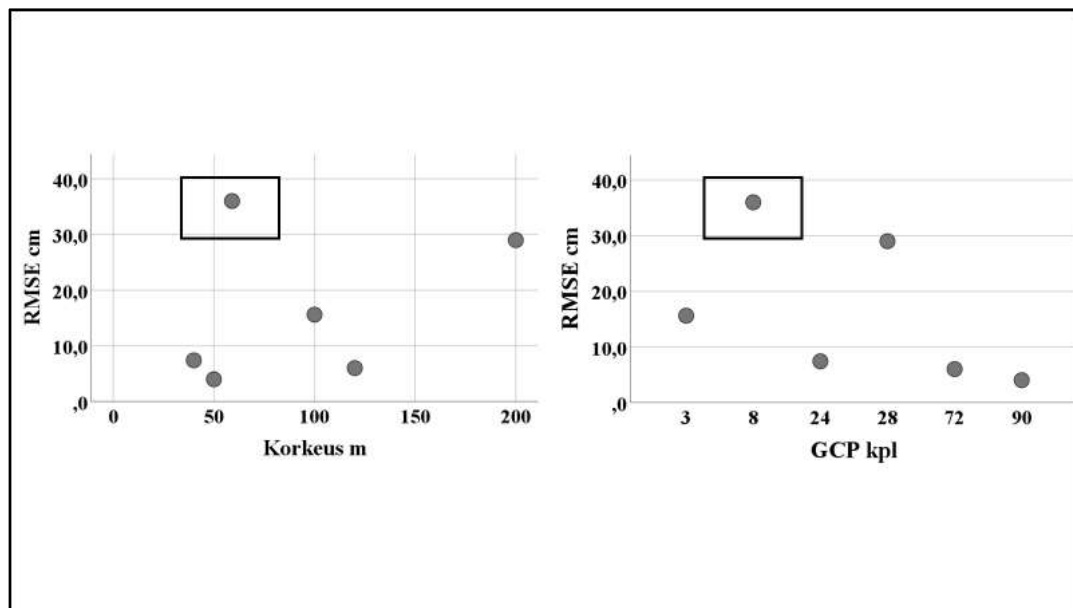
59m-mallin osalta RMSE oli 0,69 metriä ja 53,7m mallin osalta 3,59 metriä. Jättämällä poikkeavan mittauspisteen tiedot aineistosta, RMSE 59m-mallin osalta on 0,31 metriä ja 53,7m-mallin osalta 3,74 metriä. Näin ollen korkeamman mallin osalta poikkeama on keskimäärin 30 senttimetriä suhteessa vertailuaineistoon. Tulos on huomattavasti suurempi kuin johdetun pintamallin pikselitarkkuus, joten jos tarkoituksena olisi ollut tutkia muutosta, tulisi tämä asia huomioida korkeussuunnan muutoksia mitatessa.

Tuloksen luotettavuutta arvioitaessa tulee kiinnittää huomiota referenssipisteiden lukumäärään, joka on alhainen verrattuna taustakirjallisuuteen. Esimerkiksi Hugenholtz ym. (2013) käyttivät 99 vertailupistettä, Lucieer ym. (2014) tutkimuksessa vertailupisteitä oli 39 kappaletta ja Agüera-Vega ym. (2016) tutkimuksessa 72 pistettä. Kuitenkin Hugenholtzin ym. (2013) pintamallin RMSE oli 29 cm, joka on lähellä tämän tutkimuksen tulosta (31 cm) ylemmän kuvauskorkeuden osalta. Maksimivirhe yksittäisen mittauspisteen osalta oli heidän tutkimuksessaan huomattava, 76 cm. Toisaalta Hugenholtzin ym. (2013) tutkimuksessa lentokorkeus oli 200 metriä eli huomattavasti korkeampi kuin tässä tutkimuksessa. Lucierin ym.

(2014) lentokorkeus sen sijaan oli 40 metriä ja he saivat RMSE-tuloksesi itsenäisten GPS-pisteiden osalta 7,4 cm, mutta maksimivirhe oli 19,8 cm. Agüera-Vega ym. (2016) käyttämä lentokorkeus, 120 metriä, tuotti RMSE:n 5–6 cm, eli he saivat itsenäisen GPS-paikkatiedon toimiessa vertailuaineistona tarkemman mallin kuin matalammalla lentäneet Lucieer ym. (2014). Sadan metrin lentokorkeuden ja kolmen GCP:n yhdistelmällä Tonkin & Medgley (2016) pääsivät 15,6 cm:n RMS-virheeseen joten he saavuttivat korkeammalla lentokorkeudella ja vähemmällä GCP:illä pienemmän paikannusvirheen kuin tämän tutkimuksen tulokset ovat.

Tämän tutkimuksen tulokset ovat osin ristiriidassa lentokorkeuden vaikutuksesta SfM-mallin absoluuttiseen tarkkuuteen, jos vertailudatana on itsenäiset GPS-pisteet (kuva 27). Pelkästään taustakirjallisuuteen nojaten näyttäisi siltä, että lentokorkeuden ollessa matala, myös RMSE näyttäisi pysyttelevän matalalla suhteessa korkeamman lentokorkeuden RMSE-tuloksiin. Kuitenkin tämän tutkimuksen 59m-mallin tulos poikkeaa tästä trendistä ja tulos näkyykin selvästi erillisenä havaintona. Toisaalta tutkimusasetelmat eivät ole vertailussa yhtenevät ja muiden tutkimusten määrä vertailussa on rajallinen. Kuitenkin tämän tutkimuksen havaintopisteitten korkeuserot 59m-mallin ja vertailukorkeuksien osalta ovat maksimissaan -42 cm kuin esimerkiksi Hugenholtzin ym. (2013) maksimivirhe yksittäisen havainnon osalta oli 76 cm. Joka tapauksessa absoluuttisen tarkkuuden osalta tämän tutkimuksen tulos ei tue havaintoa siitä, että lentokorkeuden laskeminen parantaa mallien tarkkuutta.

Verratessa absoluuttista tarkkuutta GCP:itten määrään (kuva 27), selvää trendiä on haasteellista hahmottaa. Joka tapauksessa lievää yhteyttä RMS-virheen laskun ja GCP:itten määrän kasvun välillä voitaneen havaita. Tämän tutkimuksen tulos 59m-mallin RMS-virheen osalta korkein, mutta esimerkiksi Hugenholtz ym. (2013) käyttivät 28 kappaletta GCP:tä eikä RMSE poikkea sanaottavasti tämän tutkimuksen tuloksista. Toisaalta Tonkin & Medgley (2016) käyttivät vain kolmea GCP:tä RMSE:n ollessa 15,6 cm. Näin ollen tuloksissa on havaittavissa heiluntaa suhteessa yleiseen linjaan niin lentokorkeuden kuin myös GCP:itten määrän vaikutuksesta. Vaikka tämän tutkimuksen tulokset tältä osin poikkeavatkin kirjallisuuteen nähden, ei poikkeaman suuruudesta voida lausua luotettavasti verrokkihavaintojen määrän ollessa kohtuullisen suppea



Kuva 27. 53,7m-mallin korkeuden ja keksineliövirheen neliöjuuren (RMSE) yhteys sekä samojen tutkimusten tarkkuusmitattujen paikkatietopisteitten (GCP) ja RMSE:n yhteys. Mukana havainnoissa on tämän tutkimuksen havainto 59m-mallin osalta merkittynä neliöllä. Mukana vertailussa Harvin & Lucieer (2012), Hugenholz ym. (2013), Lucieer ym (2014), Tonkin & Medgley (2016) & Agüera -Vega ym. (2016).

53,7m-mallin kohdalla RMSE:n tulos on niin suuri, että se ei ole vertailukelpoinen absoluuttisen tarkkuuden pohdintaan. 53,7m-mallin mittauspisteiden tulosten poikkeamat virhekeskiarvosta ovat kuitenkin pienemmät kuin 59m-mallin osalla. Mallien absoluuttista virhettä voi edelleen osiltaan lisätä se, että molemmissa kuvauskorkeuden kohteissa on mukana vettä ja dyynialueen reuna tuo jyrkkyyttä korkeusprofiiliin. Jyrkkien korkeuserojen ja vedenpinnan läsnäolon tiedetään tuovan epävarmuutta malleihin (Manichini ym. 2013; Brunier ym. 2016; Cook 2016).

7.4. Pintamallien visuaalinen tarkastelu ja pinnanmuotojen havaitseminen

Visuaalisessa tarkastelussa verrattiin kahden kuvauskorkeuden SfM-pintamalleja toisiinsa niin, että molempien osalta tarkastelun kohteena olivat rannan geomorfologiset muodot ja niiden tunnistaminen. 59m-mallin ja 53,7m-mallin välillä havaittiin eroja niiden kyvyssä havaita senttimetriluokan rakenteita esimerkiksi aallonmerkkien osalta niin, että 53,7m-malli osoittautui selvästi tarkemmaksi. Molempien kuvauskorkeuksien tarkkuudet osoittautuivat riittäväksi tarkastellessa rannan profiilin mittaluokan kokonaisuuksia.

Erotuskyvyltään saadut pintamallit ovat vertailukelpoisia aikaisempaan tutkimukseen nähden, esimerkiksi Kalascka ym. (2017). Verrattaessa tämän tutkimuksen malleja keskenään osoittautuu 53,7m-malli tarkemmaksi, jos kyseessä on senttimetriluokan pinnanmuotojen havainnointi, kuten esimerkiksi aallonmerkkien kohdalla on. Tämän tutkimuksen tulokset ylittävät Brunierin ym. (2016) tulokset, jossa tarkkuudeksi saatiin kymmenen senttimerin kokoluokkaa oleva erotuskyky kuvauskorkeuden ollessa kuitenkin huomattavasti tätä tutkimusta korkeampi, ja ovat yhtenevät Harvin ja Lucieerin (2012) senttimetrin erotuskyvyn saavuttamisen kanssa.

59m-mallin rinnevarjostusformaattissa näkyvät ylitulkinnat kivien varjojen kohdalla ovat linjassa Cullenin ym. (2018) havaintojen kanssa siitä, että varjostukset voivat aiheuttaa epävarmuutta SfM-tuotteisiin. Kyseinen ylitulkinta huomattiin vertaamalla rinnevarjostusformaattia ortomosaiikkiin, kuten asian laita on myös Cullenin ja kollegoiden (2018) huomioiden osalta. Näin ollen tämän tutkimuksen havainnot korostavat SfM-tuotteiden rinnakkaisen tarkastelun hyötyjä geomorfologisten muotojen havainnoinnissa. Mielenkiintoiseksi havainnon tekee se, että kuitenkin riippumatta varjojen mallinnuksesta pinnanmuodoksi, ei 59m-malli kyennyt mallintamaan kasvillisuuden kohtia kuten kykeni 53,7m-malli, joka taasen ei ylitulkinnut varjoja. Tältä osin 53,7m-malli on luotettavampi korkeamman lentokorkeuden malliin verrattuna.

Visuaalisen tarkastelun perusteella näyttäisi siltä, että lentokorkeuden määrittämisessä tulisi ottaa huomioon tarkasteltavan kohteen vaatima tarkkuus. Tarkasteltaessa esimerkiksi rannan profiilin mittaluokan kokonaisuuksia 59 metrin lentokorkeus on riittävä ja riittää tarvittavien pinnanmuotojen havainnointiin ortomosaiikista. Toisaalta senttimetriluokan rakenteita tarkastellessa lentokorkeuden tulee olla tätä matalampi. Huomioon pitää luonnollisesti ottaa kameran tekniset ominaisuudet lentokorkeutta määritettäessä.

7.5. Tutkimuksen luotettavuuden arviointi

Aineiston keruuvaiheessa virheet liittyvät kenttätöissä tapahtuviin mahdollisiin epätarkkuuksiin. Tällaisia voivat olla esimerkiksi GCP:itten paikkojen mittaamisessa tapahtuvat inhimillisistä virheistä johtuvat epätarkkuudet tai GCP:itten määrän tai sijoittelun aikaansaamat vaikutukset tuloksiin. Kenttätöissä mittalaitteiden sijoitteluun kiinnitettiin kuitenkin suurta huomiota sekä varmistettiin niiden oikea käyttö. Näin ollen inhimillisistä virheistä johtuvien epätarkkuuksien mahdollisuus mittauksissa on alhainen, joskin sitä ei voi poissulkea. Myös itse lentolaitteen heilunta kuvauksen aikana voi aiheuttaa yksittäisten kuvien kohdalla kuvauskorkeuden vaihtelua. Absoluuttisen tarkkuuden mittauspisteinä käytettyjä itsenäisiä GPS-korkeuksia oli vähän suhteessa lähdekirjallisuuden ilmoittamiin määriin. Aineiston analysoinnissa lopputulokseen vaikuttaa myös ne asetukset, joilla analyysiä tehdään. Varsinkin kokematon tutkija voi tietämättään tai huolimattomuuttaan vaikuttaa tuloksiin, vaikka seuraisikin ohjeita mahdollisimman tarkasti ja yksittäinen virhe voi aiheuttaa lopullisiin tuloksiin systemaattista, vaikeasti havaittavaa virhettä. Toisaalta matalamman kuvauskorkeuden data on analysoitu kahdesti ja tuloksia on arvoitu kolmella eri tavalla visuaalisen tarkastelun lisäksi, joten tämä lisää tutkimuksen luotettavuutta. Tutkimuksessa käytetty lähdekirjallisuus koostuu pääosin 2010-luvun vertaisarvoiduista julkaisuista. Näitä julkaisuja on käytetty arvioidessa tämän tutkimuksen tuloksia suhteessa muuhun tutkimukseen. Koska lähdekirjallisuus on uutta, voitaneen olettaa, että tämän tutkimuksen tuloksia on verrattu tämän hetkiseen tietoon.

7. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämä tutkimuksen tavoitteena oli tutkia kuvauskorkeuden vaikutusta SfM-mallien paikannustarkkuuteen sekä visuaaliseen tarkkuuteen. Kuvauskorkeuden vaikutuksesta SfM-mallin tarkkuuteen saatiin tämän tutkimuksen perustella osin ristiriitaisia tuloksia. GCP:itten RMSE oli 53,7m(a)-mallin osalta selvästi 59m-mallia pienempi, mutta 53,7(b)-malli osoittautui 59m-mallia epätarkemmaksi. 59m-malli osoittautui 53,7(b)-mallia tarkemmaksi suhteellista tarkkuutta arvioitaessa, joskin molempien mallien perustella kyetään tekemään luotettavia johtopäätöksiä mallin käyttäytymisestä verrokkiaineistoon nähden sekä toisiinsa nähden.

Absoluuttisen paikannustarkkuuden osalta 59m-malli oli selvästi matalamman lentokorkeuden mallia tarkempi. Tulos on linjassa myös GCP:itten RMS-virheen kanssa, jossa erot tulevat etenkin z-koordinaatin RMS-virheestä. Toisaalta absoluuttisella tai suhteellisella tarkkuudella ei ole samansuuntaista vaikutusta itse mallien erotuskykyyn. Visuaaliselta erotuskyvyltään 53,7-malli on 59m-mallia tarkempi.

Tämän tutkimuksen kohdalla 53,7(a) mallin selvästi pienempi GCP:itten RMS-virhe 59m-malliin nähden antaa viitteitä siitä, että matalammalla kuvauskorkeudella on saavutettavissa tarkemmat mallit. Kuitenkin 53,7m(a) mallia ei tässä tutkimuksessa voitu käyttää vertailuun suhteellisessa ja absoluuttisessa tarkastelussa johtuen systemaattisesta paikannusvirheestä, kun malli siirrettiin ArcMap:iin. 53,7m-malli osoittautui visuaalisesti tarkemmaksi, joten matala lentokorkeus antaa SfM-mallille tarkemman erotuskyvyn. Näin ollen lentokorkeus tulee määritellä tarkasteltavan kohteen asettamien vaatimusten mukaiseksi.

Vaikka SfM-prosessi tarjoaa tutkijalle mahdollisuuden itsenäiseen tiedonkeräykseen ja prosessi on pitkälle automatisoitu, ei tämä vähennä tutkijan ammattitaidon tarvetta kokonaisprosessia kohtaan, vaan edelleen jopa lisää sitä. Prosessi on herkkä virheille lähtien kenttätöistä päätyen lopullisten analyysien tekoon, ja satunnaisvirhe kenttätöissä voi päätyä lopullisiin tuotteisiin systemaattiseksi virheeksi ilman, että tutkija havaitsee asiaa. Tämä alleviivaa itsenäisen vertailudatan tarvetta.

Vertailuaineiston olisi hyvä koostua sekä itsenisistä paikkatieopisteistä, että toisella menetelmällä tehdystä pintamallista, joten tämä on otettava huomioon, kun SfM-prosessin yksinkertaisuudesta keskustellaan.

Tutkimuksen päähuomiot ovat, että lentokorkeudella ei voida katsoa olevan yksiselitteistä ja systemaattista yhteyttä malleihin, ja että laaduntarkastelussa on käytettävä useampaa arviointitapaa sekä itsenäistä vertailuaineistoa. Tutkimusta kuvauskorkeuden vaikutuksista SfM-tuotteiden laatuun kannattaa edelleen jatkaa esimerkiksi vakioimalla lentokorkeudet ja tuottamalla samalta lentokorkeudelta kaksi itsenäistä valokuva-aineistoa eri ajankohtina.

Tähän päästäisin esimerkiksi tutkimusasetelmassa, jossa tietty dynaaminen geomorfologinen kohde kuvataan kahtena eri ajankohtana. Molemmilla ajankohdilla kohteen kuvaus suoritetaan kahdella eri lentokorkeudella. Jokaisesta yhteensä näistä neljästä lentokerran kuvista muodostetaan oma Digital elevation model (DEM). Näiden tuotteiden tarkkuutta arvioitaisiin suhteessa itsenäiseen paikkatietoon, joka ei sisälly malleihin jo valmiiksi. Näin selvitetään ensimmäisen kerran georeferoinnin tarkkuutta ja luotujen mallien hyvyttä. Tämän jälkeen tutkimusasetelman toistettavuuden arviointia jatketaan muodostamalla digital elevation model of difference (DoD) saman ajankohdan kahden eri lentokorkeuden DEM-tuotteista. Tällöin nähtäisiin, onko lentokorkeudella tai / ja kahden eri lentokerran sekä tiedonprosessointien välillä eroa myös itse digitaalisen korkeusmallien välillä. Jos DoD tältä osin ei näytä eroja korkeusmalleissa, voidaan olettaa, että tutkimusasetelman toistettavuus ja näin ollen saadut tulokset ovat luotettavia etenkin, jos referenssipaikkatiedon perusteella voidaan arvioida saadun mallin ennustavan hyvin todellista paikkatietoa. Geomorfologisen kohteen dynamiikkaa arvioitaisiin muodostamalla DoD:t eri ajankohtien saman lentokorkeuden digitaalisista korkeusmalleista. Jos kohteen morfologiassa on tapahtunut muutos, pitäisi se tulla ilmi korkeusmallien erotuksissa. Lisäksi muutosten suuruus näiden kahden DoD:n osalta pitäisi olla samanlainen.

LÄHTEET:

- Agisoft PhotoScan User Manual*, Professional Edition, Version 1.2. (2016). Agisoft LLC. 97 s.
- Agüera-Vega, F., F. Carcajal-Ramírez & P. Martínez-Carricondo (2016). Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points numbers using unmanned aerial vehicle. *Measurement*. 98, 221-227.
- Ahola, U., S. Airaksinen, R. Hirvonen, J. Pessa, A. Rajasärkkä & T. Turunen. (2015). *Hailuodon Natura 2000 -alueiden hoito- ja käyttösuunnitelma 2013–2027*. 148 s. Metsähallituksen luonnonsuojelujulkaisuja. Sarja C 132. Inspecta. Vantaa.
- Birker-Koivula, M. (2007). *Fin2005N00.asc-geoiditiedoston selitys*. Geodeettinen laitos.
Masala 1. <https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/attachments/2019/02/FIN2005N00_asc_lyhyt2.pdf> 10.10.2019.
- Birker-Koivula, M. & M. Ollikainen. (2009). *Suomen geoidimallit ja niiden käyttäminen korkeuden muunnoksissa*. Geodeettisen laitoksen tiedote 29. 54 s.
<<https://www.maanmittauslaitos.fi/sites/maanmittauslaitos.fi/files/fgi/GLtiedote29.pdf>>. 9.10.2019.
- Bakker, M. & S. N. Lane (2016). Archival photogrammetric analysis of river–floodplain systems using Structure from Motion (SfM) methods. *Earth surface processes and landforms*. 42, 1274–1286.
- Brunier, G., J. Fleury, E. J. Anthony, A. Gardel & P. Dussouillez (2016). Close-range airborne Structure-from-motion photogrammetry for high-resolution beach morphometric surveys: Examples from an embayed rotating beach. *Geomorphology*. 261, 76–88.
- Bryson, M., M. Johnson-Roberson, R. J. Murphy & D. Bongiorno (2013). Kite Aerial Photography for Low-Cost, Ultra-high Spatial Resolution Multi-Spectral Mapping of Intertidal Landscapes. *PLos One*. 8(9): e73550.
- Carbonneau, P. E. & J. T. Dietrich (2016). Cost-effective non-metric photogrammetry from consumer-grade sUAS: implications for direct georeferencing of structure from motion photogrammetry. *Earth surface processes and landforms*. 42, 473–486.
- Clapuyt, F., V. Vanacker & K. Van Oost (2015). Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms. 12 s. *Geomorphology*. 260, 4–15.

- Cullen, N. D., A. K. Verma & M. C. Bourke (2018). A comparison of structure from motion photogrammetry and the traversing micro-erosion meter for measuring erosion on shore platforms. *Earth Surface Dynamics*. 6, 1023–1039.
- Cunliffe, A. M., G. Tanski, B. Radosavljevic, W. F. Palmer, T. Sachs, H. Lantuit, J. T. Kerpy, & I. H. Myers-Smith (2019). Rapid retreat of permafrost coastline observed with aerial drone photogrammetry. *The Cryosphere*. 13, 1513–1528.
- Cook, K. (2016). An evaluation of the effectiveness of low cost-cost UAVs and Structure from motion for geomorphic change detection. *Geomorphology*. 278, 196–208.
- Davidson-Arnott, R. A. (2009). *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. 442 s. Cambridge University Press. New York.
- Dietrich, J. T. (2014). *Applications of Structure-from-Motion Photogrammetry to Fluvial Geomorphology*. Väitöskirja. Department of Geography. University of Oregon. 109 s.
- Dietrich, J. T. (2015). Riverscape mapping with helicopter-based structure-from-motion photogrammetry. *Geomorphology*. 252, 144–157.
- Dietrich, J. T. (2016). Bathymetric Structure-from-Motion: extracting shallow stream bathymetry from multi-view stereo photogrammetry. *Earth surface processes and landforms*. 42, 355–364.
- Fonstad, M. A., J. T. Dietrich, B. C. Courville, J. L. Jensen & P. E. Carbonneau (2013). Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth surface processes and landforms*. 38, 421–430.
- Föstner, W. (1986). A feature-based correspondence algorithm for image matching. *International archives of photogrammetry and remote sensing*. 26, 150–166.
- Gomez-Gutierrez, A., S. Schnabel, F. Berenguer-Sempere, F. Lavado-Contador & J. Rubio-Delgado (2014). Using 3D photo reconstruction methods to estimate gully headcut erosion. *Catena*. 120, 91–101.
- Harvin, S & A. Lucieer. (2012). Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. *Remote Sensing*. 4, 1573–1599.
- Heidel, R. C., J. W. Chipman, J. T. Dietrich & R. A. Virginia (2018). Quantifying rates of soil deflation with Structure-from-Motion photogrammetry in west Greenland. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 50. no 1. 13 s.
- Heikkilä, T. (2014). *Tilastollinen tutkimus*. 9.p. 297 s. Edita Publishing Oy, Helsinki.

- Hugenholtz, C. H., K. Whitehead, O. W. Brown, T. E. Barchyn, B. J. Moorman, A. LeClair, K. Riddell & T. Hamilton (2013). Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assesment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. *Geomorphology*. 194, 16–24.
- Hugenholtz, C. H., J. Walker, O. Brown, & S. Myshak (2015). Earthwork volumetrics with an unmanned aerial vehicle and softcopy photogrammetry. *Journal of Surveying Engineering*. 141 (1).
- Huggett, R. T. (2011). *Fundamentals of Geomorphology*. 3. P. 516 s. Routledge. Abingdon.
- Ishiguro, S., H. Yamano & H. Oguma (2016). Evaluation on DEMs generated from multi-temporal photographs using structure from motion-multi-view stereo technology. *Geomorphology*. 268, 64–71.
- James, M. R. & S. Robson (2012). Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 117, F03017.
- James, M. R., S. Robson, S. d'Oleire-Oltmanns & U. Niethammer (2017). Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology*. 280, 51–66.
- Johansson, P., L. Sahala & K. Virtanen (2000). *Rantamerkit, tuulikerrostumat ja moreenimuodostumat geologisina luontokohteina*. 79 s. Tutkimusraportti 151. Geologian tutkimuskeskus. Espoo.
- Kalacska, M., G. I. Chamura, O. Lucanus, D. Bérubé & J. P. Arroyo-Mora (2017). Structure from motion will revolutionize analyses of tidal wetland landscapes. *Remote Sensing of Environments*. 199, 14–24.
- Koci, J., B. Jarihani, J. X. Leon, R. C. Sidle, S. N. Wilkinson & R. Bartely (2017). Assessment of UAV and Ground-Based Structure from Motion with Multi-View Stereo Photogrammetry in a Gullied Savanna Catchment. *International journal of Geo-Information*. 6, 328.
- Kršák, B., P. Blišťan, A. Pauliková, P. Puškárová, Ľ. Kovanič, J. Palková & V. Zelizňaková (2016). Use of low-cost UAV photogrammetry to analyze the accuracy of a digital elevation model in a case study. *Measurement*. 91, 276–287.
- Küng, O., C. Strecha, A. Beyeler, J-C. Zufferey, D. Floreano, P. Fua, & F. Gervais (2011). The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imaginary. International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. Volume XXXVIII-1/C22. ISPRS Zurich 2011 Workshop, 14–16 September 2011, Zurich, Switzerland.

- Lucieer, A., S. M. de Jong & D. Turner (2014). Mapping landslide displacements using structure from motion (SfM) and correlation of multi-temporal UAV photography. *Progress in physical geography*. 38(1), 97–116.
- Mallalieu, J., J. L. Carravick, D. J. Quincey, M. W. Smith & H-M. W. James (2017). An integrated structure-from-motion and time-lapse technique for quantifying ice-margin dynamics. *Journal of Glaciology*. 64(242), 937–949.
- Marteau, B. M., D. Vericat, C. Gibbins, R. J. Batalla & D. R. Green (2016). Application of Structure-from-Motion photogrammetry to river restoration. *Earth surface processes and landforms*. 42, 503–515.
- Mancini, F. M., M. Dubbin, F. Gattelli, S. F. Stecchi & G. Gabbianelli (2013). Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution Reconstruction of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments. *Remotesensing*. 5, 6880–6898.
- Mesas-Carrascosa, F-J., J. Torres-Sánchez, I. Clavero-Rumbao, A. García-Ferrer, J-M. Peña, I. Borra-Serrano, & F. López-Granados (2015). Assessing Optimal Flight Parameters for Generating Accurate Multispectral Orthomosaicks by UAV to Support Site-Specific Crop Management. *Remote Sensing*. 7(10): 12793–12814.
- Metsämuuronen, J. (2005). Tutkimuksen tekemisen perusteet ihmistieteissä. 3. p. 1292 s. Gummerus kirjapaino Oy, Jyväskylä.
- Micheletti, N., J. H. Chandler & S. N. Lane (2014). Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone. *Earth surface processes and landforms*. 40, 473–486.
- Micheletti, N., J. H. Chandler & S. N. Lane (2015). Structure from Motion (SfM) Photogrammetry. *Teoksessa* Clarke L. E. & J. M. Nield (toim) *Geomorphological techniques* (online edition). 2047-0371. London: British Society for Geomorphology.
- Mölg, N. & T. Bolch (2017). Structure-from-Motion Using Historical Aerial Images to Analyse Changes in Glacier Surface Elevation. *Remote Sensing*. 9, 1021.
- Nouwakpo, S. K., M. R. James, M. A. Weltz, C. Huang, I. Chagas & L. Lima (2014). Evaluation of structure from motion for soil microtopography measurement. *The photogrammetric record*. 29(147): 297–316.
- Pearson, E., M., W. Smith, M. J. Klaar & L. E. Brown (2017). Can high resolution 3D topographic surveys provide reliable grain size estimates in gravel bed rivers? *Geomorphology*. 293, 143–155.

- Piermattei, L., L. Caruran & A. Guarnieri (2015). Use of terrestrial photogrammetry based on structure-from-motion for mass balance estimation of a small glacier in the Italian alps. *Earth surface processes and landforms*. 40, 1791–1802.
- Prosdocimi, M., S. Callicrano, G. Sofia, G. Fontana & P. Tarolli (2015). Bank erosion in agricultural drainage networks: new challenges from structure-from-motion photogrammetry for post-event analysis. *Earth surface processes and landforms*. 40, 1891–1906.
- Ranta, E., H. Rita & J. Kouki (1994). *Biometria: Tilastotiedettä ekologeille*. 569 s. Yliopistopaino. Helsinki.
- Reineck, H.-E. & I. Singh (1980). *Depositional Sedimentary environments*. 2. p. 549 s. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Russell, T. S. (2016). Calculating the Uncertainty of a Structure from Motion (SfM) Model, Cadman Quarry, Monroe, Washington. University of Washington. MESSAGE Technical Report Number: 030.
- Sirkiä, T., T. Ahonen, R. Ilves, U. Pyysalo, E. Ahokas & J. Oksanen (2017). *Kansallisen maastotietokannan laatumalli. Korkeusmallit*. Versio 1.3. 17 s. Maanmittauslaitos. Masala.
- Smith, M. W. & D. Vericat (2015). From experimental plots to experimental landscapes: topography, erosion and deposition in sub-humid badlands from structure-from-motion photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*. 40, 1656–1671.
- Smith, M. W., J. L. Carrivick & D. J. Quincey (2015). Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in Physical Geography* 40:2, 247–275.
- Tonkin, T. N. & N. G. Midgley (2016). Groud-control networks for image based surface reconstruction: An investigation of optimum survey design using UAV derived imagery and structure-from-motion photogrammetry. *Remote Sensing*. 8(9), 786.
- Ullman, S. (1979). *The Interpretation of Visual Motion*. MIT Press: Cambridge, Mass.
- USGS Unmanned aircraft systems data post-processing Structure-from-motion photogrammetry. (2017). USGS National UAS Prject Office. <<https://uas.usgs.gov/nupo/pdf/PhotoScanProcessingDSLRLMar2017.pdf>>
- Uusinoka, R. (1981). *Yleinen maaperägeologia osa 2: sedimentit ja sedimentaatioprosessit*. 272 s. Helsingin yliopisto, Geologian ja paleontologian osasto. Helsinki.

- Wallace, L., A. Lucieer, Z. Malenovský, D. Turner & P. Vopenka (2016). Assessment of Forest Structure Using Two UAV Techniques: A Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Forests*.7(3), 62.
- Westoby, M. J., J. Brasington, N. F. Glasser, M. J. Hambrey & J. M. Reynolds (2012). 'Structure-from-motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179, 300–314.
- Westoby, M. J., S. A. Dunning, J. Woodward, A. S. Hein, S. M. Marrero, K. Winter & D. E. Sugden (2015). Sedimentological characterization of Antarctic moraines using UAVs and Structure-from-Motion photogrammetry. *Journal of Glaciology*. 61: 230, 1088-1102.
- Woodged, A. S., P. E. Carbonneau, F. Visser, I. P. Maddock (2013). Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry. *Earth surface processes and landforms*. 40, 47–64.